



**António Manuel
Abreu Ferreira**

**Análise Técnico-Económica da Utilização de
Materiais Poliméricos em Permutadores de Calor**



**António Manuel
Abreu Ferreira**

**Análise Técnico-Económica da Utilização de
Materiais Poliméricos em Permutadores de Calor**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos
Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar Convidada, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço desde já aos meus orientadores, Professora Doutora Mónica Oliveira e Professor Doutor Nelson Martins, pela forma determinada como apresentaram o seu apoio à evolução deste trabalho, quer em termos técnicos quer nos meios humanos sempre presentes.

O meu profundo agradecimento ao Engenheiro Luís Godinho – Prirev, Lda – pelo acompanhamento prestado, as discussões que fizeram evoluir este trabalho e pelos imensos artigos que disponibilizou, da sua pesquisa bibliográfica.

Ao Eng. Miguel Paiva e Eng.^a. Dina Fernandes – HeliRoma, Lda – pela abertura que apresentaram no contacto deste trabalho com o meio industrial e o apoio fundamental da bibliografia disponibilizada.

Aos laboratórios de investigação SKZ, TeCona GmbH, através de Mr. Klute e Becetel – Belgian Research Centre for Pipes and Fittings, através de Mr. Joris Vienne, o meu obrigado pelos esclarecimentos prontos, relativamente à correcta utilização das normas que guiaram parte deste trabalho, onde inclui ainda o Doutor Arlindo Antunes – Instituto Português da Qualidade.

Às empresas Duorep, Lda, pelo Eng. Ricardo e Mold-Tech, Lda, pelo Eng. Paulo Vilaça, deixo aqui também o meu agradecimento pela colaboração e disponibilidades na busca de soluções para as questões técnicas.

A dois amigos em especial, João Soares e Marta Sousa, gostaria de agradecer a incondicional disponibilidade no apoio ao desenvolvimento do software e no, não menos importante, apoio pessoal.

Finalmente, reconhecer o apoio das pessoas que são mais importantes para mim e que sem elas, de forma alguma seria possível este trabalho, a minha família e a minha namorada.

Palavras-chave

Permutador de calor imerso, polímero, análise térmica, análise mecânica, simulação

Resumo

A crescente procura de sistemas de aquecimento de água solar e consequentemente de sistemas de armazenamento, nomeadamente baseados na utilização de permutadores de calor imersos, têm originado um aumento do valor das principais matérias-primas utilizadas (cobre e aço inox). Deste modo, a utilização de materiais poliméricos será tanto mais viável economicamente quanto maior o custo dos materiais metálicos referidos, para além de permitirem dar resposta às necessidades de produção de permutadores de calor, tão ou mais eficientes termicamente.

Este trabalho reporta a análise de viabilidade da aplicação de materiais poliméricos em permutadores de calor imersos, no que diz respeito ao desempenho térmico e mecânico. É ainda apresentada uma análise económica da substituição dos materiais metálicos utilizados convencionalmente por materiais poliméricos.

A análise termodinâmica envolveu o desenvolvimento de um procedimento de cálculo e a sua implementação numa aplicação informática dedicada (*PCi*), que permite a comparação do comportamento térmico de um permutador de calor imerso para diferentes condições e materiais. Foi ainda proposto um modelo de validação experimental tendo em vista a aferição dos valores fornecidos pela aplicação desenvolvida.

A análise mecânica teve como objectivo estabelecer as condições para a determinação da resistência mecânica de tubos poliméricos, tendo sido proposto um modelo experimental para obtenção das pressões de rebentamento, que são posteriormente utilizadas na determinação da pressão de serviço máxima admissível, para valores definidos de temperatura e tempo. O procedimento de cálculo foi estabelecido por recurso à norma ISO/DIS 9080, tendo sido ainda implementada uma aplicação informática dedicada.

A análise económica permitiu definir a relação entre o preço dos materiais metálicos e dos materiais poliméricos, que torna viável economicamente a aplicação dos materiais poliméricos em permutadores de calor.

A aplicação informática desenvolvida considera pois a análise térmica e a análise económica, possibilitando, deste modo, uma análise técnico-económica da viabilidade de utilização de diferentes tipos de materiais em diversas condições.

Keywords

Immersed heat Exchanger, polymer, thermal analysis, mechanical analysis, simulation

Abstract

The growing search for solar water heating systems and therefore for storage systems, namely based on the use of immersed heat exchangers, have been originating a value increase of the principal raw material used (copper and stainless steel). The use of polymeric materials in immersed heat exchangers finds its justification in the price increase of metallic materials typically used, and the thermal efficiency that will be enabled. The latter should obviously be the same or higher than those provided by the metallic materials.

This work refers to the analysis of the viability of application of polymeric materials in immersed heat exchangers, in what concerns to its thermal and mechanical performance. It is also presented an economic analysis of the replacement of the metallic materials conventionally used by polymeric ones.

The thermodynamic analysis involved in the development of an estimate proceeding and its implementation on a dedicated computing application (PCi), allows the comparison of the thermal behaviour of the immersed heat exchangers at different conditions for different type of materials. Furthermore, an experimental model is proposed for the validation of the results obtained by the developed application.

The mechanical analysis carried out aimed at the establishment of the conditions for the determination of the mechanical resistance of polymeric tubes. It is also proposed an experimental model to obtain extreme pressures that will be used ahead in the determination of the maximum service pressure admissible, for the defined values of temperature and time.

The procedure to estimate the above referred extreme pressures for different service conditions was established following the ISO/DIS 9080 standard. The same has been carried out through the implementation of a dedicated computing application.

The economical analysis allowed defining the relationship between metallic and polymeric materials price that makes the replacement economically feasible.

The developed computing application considers the thermal and economic analysis, making possible this way, to establish the viability of using different material types under several service conditions.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	3
1.3. NOMENCLATURA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. PERMUTADORES DE CALOR (PC's).....	6
2.1.1. <i>Permutadores de Calor Imersos</i>	10
2.1.2. <i>Desenvolvimentos dos Permutadores de Calor Imersos</i>	12
2.1.3. <i>Fluído de transferência de calor</i>	14
2.2. MATERIAIS UTILIZADOS	15
2.2.1. <i>Materiais Metálicos</i>	15
2.2.2. <i>Materiais Poliméricos</i>	18
3. CRITÉRIOS DE SELECÇÃO	21
3.1. ENQUADRAMENTO AMBIENTAL	21
3.2. CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS	22
4. ANÁLISE TERMODINÂMICA	25
4.1. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	25
4.1.1. <i>Transferência de Calor por Condução</i>	26
4.1.2. <i>Transferência de Calor por Convecção</i>	27
4.1.3. <i>Transferência de Calor por Radiação</i>	28
4.2. PERMUTADORES DE CALOR IMERSOS – PROJECTO	29
4.2.1. <i>Hidráulica Aplicada a Permutadores de Calor Tubulares</i>	30
4.2.2. <i>Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção – Interior</i>	33
4.2.3. <i>Rendimento de um Permutador de Calor Imerso</i>	34
4.2.4. <i>Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção – Exterior</i>	34
4.2.5. <i>Procedimento de Cálculo</i>	36
4.2.6. <i>Software PCi</i>	42
4.3. MODELO EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE.....	48
4.3.1. <i>Condições de Ensaio</i>	48
4.3.2. <i>Procedimento de Aferição</i>	50
4.3.3. <i>Bancada de Ensaios</i>	52
4.3.4. <i>Caderno de Encargos</i>	54
4.4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	55
4.4.1. <i>Condições de projecto</i>	55
4.4.2. <i>Apresentação de Resultados</i>	57
5. ANÁLISE MECÂNICA	61
5.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE TUBOS POLIMÉRICOS	62
5.1.1. <i>Tempo limite de extrapolação: factor k_e</i>	64

5.1.2. Modelos de regressão	67
5.1.3. Determinação do ponto de inflexão	70
5.1.4. Dados a recolher	72
5.2. APLICAÇÃO MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	75
5.2.1. Procedimento de Cálculo	76
5.2.2. Apresentação de Resultados	78
5.3. MODELO EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DAS PRESSÕES DE REBENTAMENTO .	79
5.3.1. Condições de ensaio	79
5.3.2. Bancada de Ensaio	80
5.3.3. Caderno de Encargos	84
6. ANÁLISE ECONÓMICA	95
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
7.1. CONCLUSÕES	101
7.2. TRABALHO FUTURO	102
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	I
COMPONENTES – CARACTERÍSTICAS E CUSTOS	II

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O potencial disponível em Portugal para aproveitamento de energia solar para aquecimento de água é significativo. De acordo com estudos elaborados no âmbito da energia solar [1], [2], no nosso país poderiam ser instalados no sector doméstico cerca de 7 500 000 m² de colectores solares, proporcionando cerca de 4 900 GWh/ano de energia útil. Para a indústria estima-se em cerca de 7 000 000 m² o potencial de área de colectores solares para produção de água quente de processo.

O mais recente Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (*RCCTE*), publicado em Diário da República em 4 de Abril de 2006 [3], diz no seu artigo 7º, ponto 2: “O recurso a sistemas de colectores solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos edifícios abrangidos pelo *RCCTE* é obrigatório sempre que haja uma exposição solar adequada, ...”. Acrescenta ainda que “A obrigatoriedade da instalação de painéis solares para a produção de água quente sanitária abre um amplo mercado para o desenvolvimento da energia solar renovável, que tão subutilizada tem sido, contribuindo para a diminuição da poluição e da dependência energética do nosso país.”

A problemática energética não se resume à captação de energia. Um dos aspectos fulcrais prende-se com o armazenamento da energia captada, sendo este o modo de ultrapassar a característica cíclica da captação de energia solar. Idealmente deveria ser possível armazenar a energia térmica gerada durante o verão para ser utilizada no inverno (armazenamento sazonal). O armazenamento da energia sob a forma de água quente é o mais utilizado pela sua simplicidade técnica e baixo custo.

Segundo a Agência Internacional de Energia (*IEA*) um incremento anual de 1% do consumo de energia solar requer uma extracção de 22 mil toneladas de cobre. Atendendo que a produção mundial de cobre é aproximadamente de 15 mil toneladas por ano, é evidente a necessidade de desenvolver sistemas baseados na utilização de outros materiais [4].

Materiais poliméricos são exemplos a explorar.

As principais vantagens dos materiais poliméricos são: o baixo custo da generalidade dos polímeros (da matéria-prima e da produção), peso reduzido (beneficiando por exemplo o transporte) e a elevada reciclabilidade.

Atendendo que as propriedades térmicas e mecânicas, dos polímeros e dos metais, são bastante distintas é imperativo aferir a durabilidade e a eficiência térmica de permutadores de calor poliméricos face aos permutadores convencionais (*em cobre ou aço inox*). Para tal há que balizar as condições de utilização a que se destina o permutador de calor e submetê-lo a análise nessas mesmas condições, com os respectivos coeficientes de segurança.

Com vista aos fins comerciais, é necessária uma análise económica da alteração dos materiais (*materiais metálicos por materiais poliméricos*).

Este trabalho vai centrar-se na análise térmica, mecânica e económica da utilização de permutadores de calor imersos, construídos em materiais poliméricos. Dentro deste âmbito o estudo será direccionado para os permutadores de calor de utilização doméstica, isto é, para aquecimento de água em tanques de armazenamento, de modo a acompanhar o desenvolvimento de sistemas solares para aquecimento de água, em que se pretende que sejam integralmente de base polimérica. Segundo a *IEA*, este é um passo que é necessário dar no mais curto prazo.

1.2. OBJECTIVOS

Foram estabelecidos os seguintes objectivos:

- (i) Análise dos permutadores de calor tipicamente utilizados em sistemas de armazenamento de energia;
- (ii) Estudo das solicitações térmicas e mecânicas a que os permutadores de calor estão sujeitos;
- (iii) Definição dos critérios de selecção dos polímeros para esta aplicação e respectiva análise. Materiais passíveis de serem utilizados;
- (iv) Enquadramento ambiental;
- (v) Eficiência térmica dos diferentes materiais poliméricos face à eficiência dos materiais metálicos;
- (vi) Desenvolvimento de um *software* que permita verificar a eficiência térmica de um permutador polimérico partindo das suas características físicas e das condições de operacionalidade;
- (vii) Análise do comportamento mecânico dos permutadores de calor imersos;
- (viii) Distinção económica da utilização de materiais poliméricos ou metálicos em permutadores de calor imersos;
- (ix) Procedimentos experimentais para análise térmica e mecânica.

1.3. NOMENCLATURA

Abreviaturas

- U – Coeficiente Global de Transferência de Calor $\left[W/m^2 * K\right]$;
- ΔT_{lm} – Média logarítmica da diferença de temperatura $[^{\circ}C]$;
- Q – Energia Transferida $[J]$;
- q – Taxa de transferência de calor $[W]$;
- q'' – Fluxo de Calor $\left[W/m^2\right]$;
- P – Potência $[W]$
- t – Tempo $[s]$;
- T – Temperatura $[^{\circ}C]$;
- h_i – Coeficiente de transferência de calor por convecção, no interior do permutador $\left[W/m^2 * K\right]$;
- h_o – Coeficiente de transferência de calor por convecção, no exterior do permutador $\left[W/m^2 * K\right]$;
- Nu_i – Número de *Nusselt* para o fluido no interior do permutador $[-]$;
- Nu_o – Número de *Nusselt* para o fluido no exterior do permutador $[-]$;
- K_i – Coeficiente de transferência de calor por condução, no interior do permutador $\left[W/m * K\right]$;
- K_o – Coeficiente de transferência de calor por condução, no exterior do permutador $\left[W/m * K\right]$;
- A_i – Área lateral do interior do tubo $[mm^2]$;
- A_o – Área lateral do exterior do tubo $[mm^2]$;
- D_i – Diâmetro interior $[mm]$;
- D_o – Diâmetro exterior $[mm]$;
- L – Comprimento do permutador de calor imerso, para um tubo ou para um banco de tubos $[m]$;
- f – factor de fricção $[-]$;
- ε – Rugosidade superficial $[mm]$ / emissividade $[-]$;

- Re_D – Número de Reynolds, em escoamento numa conduta circular [-];
- n – Número de tubos que compõe o banco de tubos [-];
- n_i – constante tabelada da equação para convecção livre num tubo horizontal cilíndrico [-];
- C_i – constante tabelada da equação para convecção livre num tubo horizontal cilíndrico [-];
- T (Saída) – Temperatura à saída do PC [°C];
- T (Entrada) – Temperatura à entrada do PC [°C];
- T (Tanque) – Temperatura da água onde está imerso o PC [°C];
- \bar{T} (média) – Temperatura média entre a entrada e a saída do PC [°C];

Monogramas

- *IEA* – *International Energy Agency*
- *AM* – Análise Mecânica
- *AT* – Análise Térmica
- *PC* – Permutador de calor
- *PC's* – Permutadores de Calor

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PERMUTADORES DE CALOR (*PC's*)

O processo de troca de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida ocorre em inúmeras aplicações de engenharia. O equipamento utilizado para promover esta troca de calor é designado por *Permutador de Calor*, sendo possíveis diversas aplicações, tais como o aquecimento de ambientes, ar condicionado, produção de potência, recuperação de calor perdido e processamento químico.

A literatura [5] identifica, vários parâmetros que influenciam a eficiência de um *PC*, como:

- Material em que é construído;
- Líquido que circula no seu interior e exterior;
- Tipo de escoamento;
- Geometria;
- Temperaturas de operação.

Os permutadores de calor são tipicamente classificados de acordo com o arranjo do escoamento e tipo de construção. A configuração mais simples consiste numa construção de *tubo concêntrico* (ou *tubo duplo*) onde dois fluidos, um quente e outro frio, se deslocam na mesma direcção (correntes paralelas) ou em direcção oposta (correntes opostas).

No arranjo de *Correntes Paralelas*, *Figura 1 (a)*, os fluidos quente e frio entram na mesma extremidade, escoam na mesma direcção e saem na mesma extremidade. No arranjo de *Correntes Contrárias*, *Figura 1 (b)*, os fluidos entram em extremidades opostas, escoam em direcções opostas e saem em extremidades opostas.

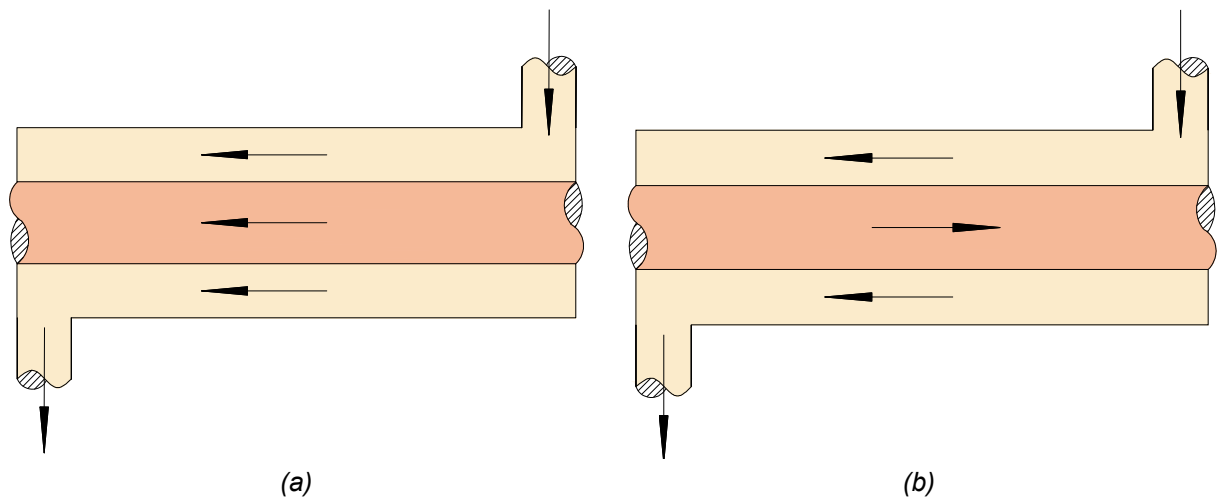


Figura 1 – Permutador de calor de tubo concêntrico

Outra configuração consiste no movimento em *Correntes Cruzadas*, dos fluidos. A *Figura 2* mostra um permutador tubular *alhetado* em que se designa o movimento do fluido sobre o tubo de *não-misturado*, uma vez que as alhetas restringem o movimento a uma direcção – transversal à direcção principal. Por outro lado, o permutador tubular pode ser *não-alhetado*, *Figura 3*, sendo que o fluido exterior é *misturado* e o interior é, tal como no anterior, *não-misturado*. Neste último caso as variações de temperatura são essencialmente na direcção do escoamento principal. Estas características influenciam significativamente o desempenho do *PC*.

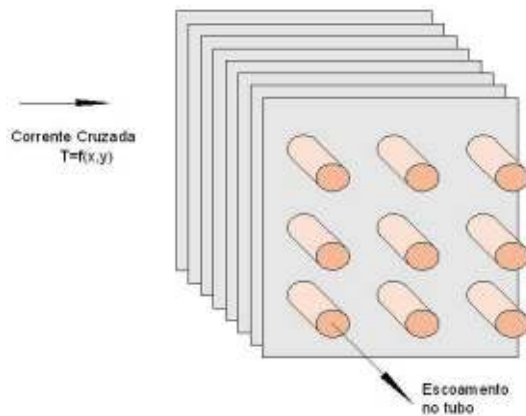


Figura 2 – PC de Correntes Cruzadas, Alhetado com dois fluidos não misturados

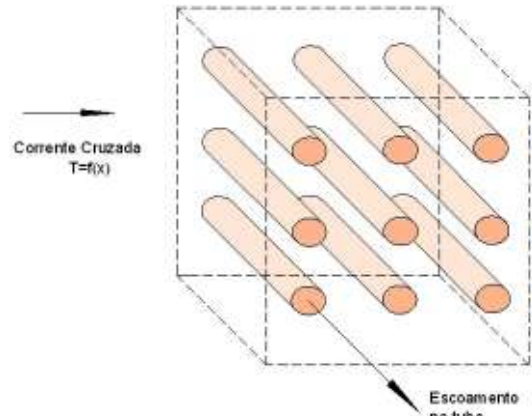


Figura 3 – PC de Correntes Cruzadas, Alhetado com um fluido misturado e outro não misturado

Permutadores de Calor de Casco e Tubo são especialmente utilizados em aplicações de grandes dimensões. Podem ser construídas com diferentes formas, de acordo com o número de passes no casco e tubo. A forma mais simples, que envolve um único passe no tubo e no casco é mostrada na *Figura 4*. Chicanas são frequentemente utilizadas para aumentar o coeficiente de convecção do fluido do lado do casco pela indução da turbulência. A *Figura 5* mostra permutador de calor de casco e tubo, com chicanas com um passe no casco e dois passes no tubo, e outro com dois passes no casco e quatro no tubo, respectivamente.

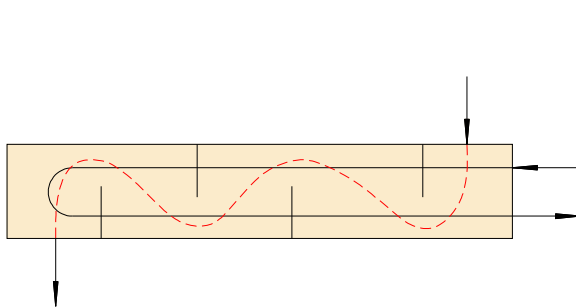


Figura 4 – Permutador de Tubo e Casco

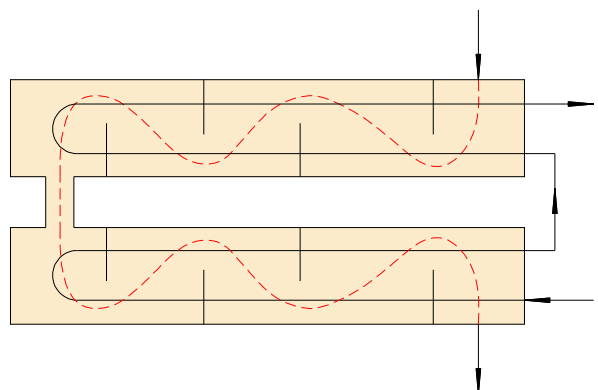


Figura 5 – Permutador de Tubo e Casco

Os *Permutadores de Calor Compactos* são uma classe especial e relevante de *PC's* utilizados especialmente em pequenos componentes e têm como principal característica a elevada área de superfície de transferência de calor por unidade de volume ($> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

A sua configuração contém arranjos densos de tubos alhetados e são tipicamente utilizados quando no mínimo um dos fluidos é um gás, caracterizado por baixo coeficiente de transferência de calor por convecção.

Os tubos podem ser planos ou circulares, e as alhetas podem ser planas ou circulares. Permutadores de calor de placas podem ser alhetados e podem ser utilizados em formas de operação com único passe, ou múltiplos passes. As secções de escoamento associadas a este tipo de *PC* são tipicamente pequenas ($D_h < 5 \text{ mm}$) sendo o escoamento normalmente laminar [6].

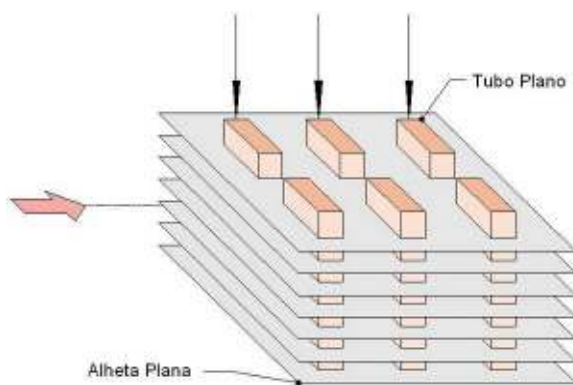


Figura 6 – Permutador de calor compacto – Tubo Plano

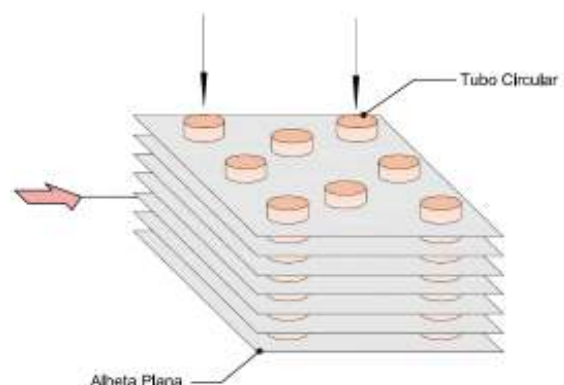
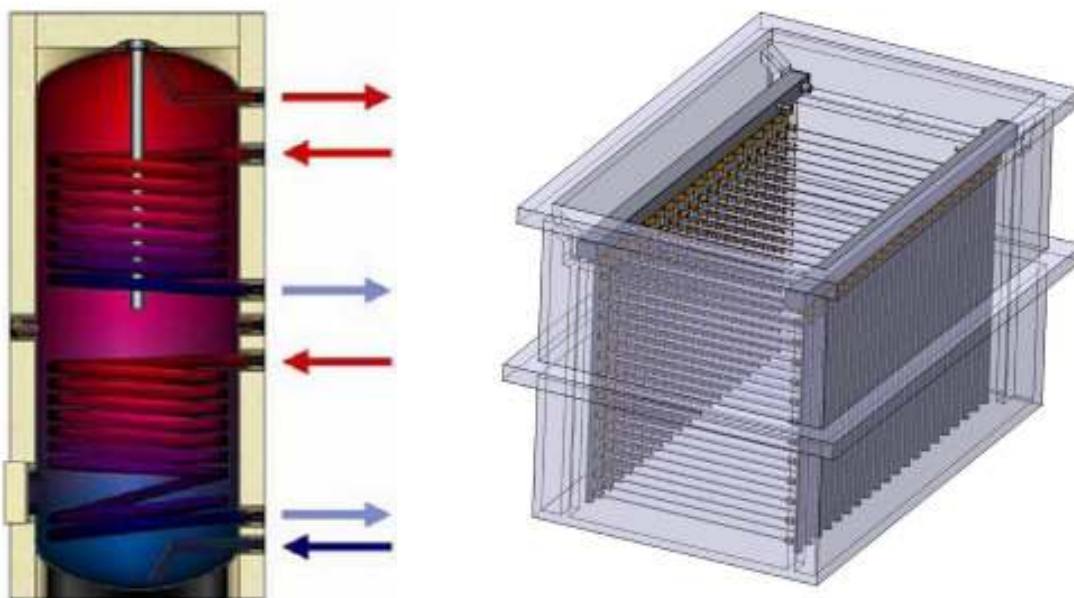


Figura 7 – Permutador de calor compacto – Tubo circular

2.1.1. Permutadores de Calor Imersos

O presente trabalho centra-se no estudo de permutadores de calor imersos para utilização doméstica.

Os permutadores de calor imersos distinguem-se pelo facto de se considerar nula a velocidade do fluído exterior. Nos sistemas térmicos de armazenamento de água o permutador de calor está imerso num fluído dentro de um tanque, sendo que no interior do permutador existe um escoamento com um determinado caudal e uma determinada velocidade.



(a) – Aplicação doméstica [7]

(b) – Aplicação de laboratório

Figura 8 – Exemplo de Permutadores de Calor Imersos

Os permutadores de calor imersos disponíveis podem ser “tubulares com alhetas” e “tubulares lisos”. O permutador de calor tubular liso possui uma maior capacidade de troca de calor por metro quadrado de superfície. Comparando os permutadores de calor tubulares com alhetas, os permutadores lisos requerem tubos com maior comprimento.

A área de superfície de um permutador de calor de tubo com alhetas aumenta significativamente, de modo a que um permutador de calor deste tipo, embora tendo um funcionamento com transferência mais baixa por metro quadrado, é mais compacto do que um permutador de calor com tubo liso, com o mesmo funcionamento, ou seja, troca mais calor por unidade de comprimento de permutador.

Desta forma os permutadores de calor tubulares lisos são instalados em fábricas enquanto que permutadores de calor com alhetas, devido ao seu design mais compacto, podem ser instalados dentro de tanques de armazenamento directamente no local de instalação do sistema.

De destacar que a área da superfície de transferência efectiva dos permutadores de calor pode ser reduzida através da sua cobertura com calcário. Uma camada de 2 mm de espessura reduz a capacidade de transferência de calor do permutador de calor em 20%, enquanto 5 mm de espessura reduz a mesma em mais de 40%, [8].

A instalação vertical dos permutadores promove o efeito de estratificação térmica no sistema de armazenamento e as ligações ao circuito solar devem ser feitas de modo a que o fluxo permutado seja de cima para baixo, optimizando a passagem de calor.

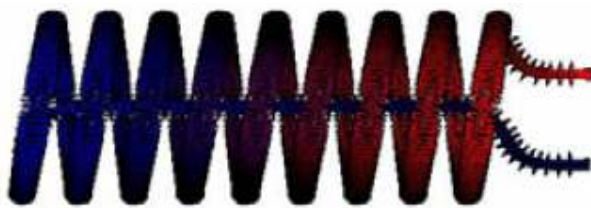


Figura 9 – Permutador de Calor com Alhetas [8]

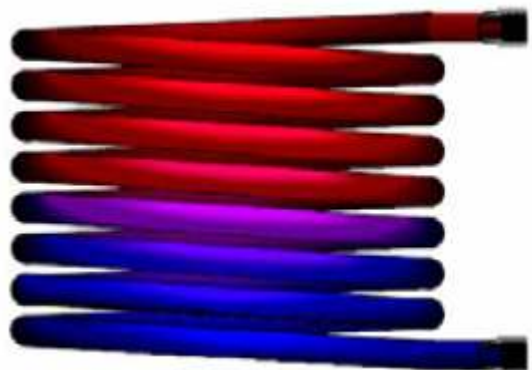


Figura 10 – Permutador de Calor Liso [8]

2.1.2. Desenvolvimentos dos Permutadores de Calor Imersos

A aplicação de materiais poliméricos em permutadores de calor imersos tem sido incentivada dado o enquadramento apresentado no capítulo de introdução. Vários estudos foram já desenvolvidos a fim de avaliar a possibilidade e capacidade dos materiais poliméricos quando os principais objectivos são a transferência de calor e a resistência mecânica a longo tempo.

A comparação entre os materiais poliméricos e o cobre – material metálico mais utilizado em permutadores de calor imersos – é apresentada no artigo [9], em termos de análise térmica. São efectuados cálculos para o comportamento de um banco de tubos imersos em água (*unpressurized drains back-tank*), com escoamento forçado no interior dos tubos e convecção natural no exterior.

No artigo referido foram analisados e comparados três materiais: *PEX* (Polietileno Reticulado), *Nylon* (ou Poliamidas) e *Cobre*, quanto à troca de calor de 3000 [W] e 6000 [W] com diferentes caudais e com geometrias definidas, sendo que os tubos construídos nos materiais poliméricos têm diâmetros e espessuras de parede inferiores ao tubo de cobre. Os materiais poliméricos referidos foram propostos através das propriedades mecânicas definidas pelo fornecedor.

Os resultados comparam o comprimento de tubo necessário de cada um dos tubos, para transmitir uma taxa total de transferência de calor – Q .

Exemplo de dados utilizados e apresentados no estudo:

- $Q = 3000$ [W]
- *Nylon*: $D_o = 3,81$ [mm]; $D_o = 3,41$ [mm]
- *PEX*: $D_o = 9,53$ [mm]; $D_o = 5,97$ [mm]
- *Cobre*: $D_o = 15,88$ [mm]; $D_o = 14,67$ [mm]

Tabela 1 – Tabela comparativa de comprimentos de materiais poliméricos e cobre, [9]

Caudal [l/min]	L_{Nylon} [m]	L_{PEX} [m]	L_{Cobre} [m]
6	150,4	133,6	22,1
8	133,7	106,9	16,1

Outro estudo semelhante é apresentado no artigo [10], com resultados que são expostos de forma semelhante que o anterior, sendo que é feita uma análise económica dos comprimentos de tubo obtidos para os permutadores de calor construídos em materiais poliméricos e em cobre.

O artigo analisa dois tipos de permutadores, os imersos e os de casco e tubo, propondo diferentes materiais poliméricos mediante as características exigidas pelas normas *NSF (National Sanitation Foundation)*. Concluindo que o *PEX* e as *Poliamidas* são os materiais poliméricos mais indicados, pelas propriedades anunciadas pelos fornecedores destes materiais e pelos custos dos mesmos.

Uma dificuldade na análise térmica de permutadores de calor imersos é não serem comuns as correlações que expressem o comportamento da convecção unicamente natural no exterior de um banco de tubos imersos num líquido.

Estas equações são desenvolvidas e divulgadas no artigo [11], onde é analisado o comportamento térmico no interior de tanques para armazenamento de calor em sistemas de aquecimento solar de água.

As equações fundamentais são as relacionadas com as correlações do *Número de Nusselt* e de *Rayleigh* e da média logarítmica da diferença de temperatura corrigida. Estas equações são apresentadas no capítulo da análise termodinâmica.

A indústria actual aplica os permutadores de calor imersos construídos em materiais poliméricos, com as suas características inertes, em ambientes altamente corrosivos, onde os materiais metálicos se degradam rapidamente. São bastante utilizados devido ao isolamento eléctrico que oferecem, evitando curto-circuitos e correntes dispersas em banhos electrolíticos. Os permutadores de calor poliméricos evitam a acumulação de sujidade nas paredes dos tubos, mantendo as propriedades de transferência de calor em todos os momentos do processo produtivo e evitando custos associados à manutenção, que pode ser extremamente dispendiosa em determinados casos. Estas soluções são apresentadas por [12] com polímeros indicados por exemplo por [13].

2.1.3. Fluido de transferência de calor

O fluido de transferência térmica transporta o calor produzido no colector para o tanque de armazenamento solar. O líquido normalmente utilizado é a água devido às seguintes propriedades:

- Capacidade térmica elevada;
- Condutividade térmica elevada;
- Baixa viscosidade.

Para além disso a água:

- Não entra em combustão;
- Não tem toxicidade;
- É barata.

Uma vez que a temperatura de operação nos sistemas de aquecimento pode variar entre -15 °C e 200 °C, se for utilizada água como meio de transferência de calor existirão problemas devidos ao congelamento (0 °C) e evaporação (100 °C).

No caso em que o fluido de transferência térmica não é o fluido de consumo (funcionamento específico do sistema de aquecimento em recirculação), de forma a aumentar o intervalo em que a água se apresenta no seu estado líquido, é adicionado glicol (anticongelante). Desta forma baixa-se o ponto de congelamento e aumenta-se a temperatura de ebulição da mistura.

No entanto a adição de glicol ao fluido aumenta o efeito corrosivo da água, sendo por esta razão necessária a adição de inibidores de acordo com as características destes para os materiais específicos da instalação. Para além do aumento do efeito corrosivo, a adição de glicol altera as propriedades do fluido de transferência térmica com:

- Diminuição das capacidades térmicas;
- Redução da condutividade térmica;
- Aumento da viscosidade;
- Aumento do atrito.

A biodegradabilidade e não toxicidade são características fundamentais nos fluidos para esta aplicação.

2.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os permutadores de calor partilham o mesmo princípio mas têm aplicações diversas. Dependendo da aplicação a que se destinam podem ser construídos em *Cobre*, *Aço Inoxidável* ou em *Plástico*. Dentro de cada um destes tipos de materiais há uma diversidade relativamente grande de subtipos utilizados, devido às características mecânicas e económicas afectas a cada um destes tipos.

Os materiais metálicos são os mais utilizados em aplicações de grande consumo, como sistemas domésticos, e os materiais poliméricos em aplicações mais específicas, como a indústria química ou alimentar com ambientes corrosivos ou reactivos.

2.2.1. Materiais Metálicos

Os materiais metálicos partem desde logo em vantagem devido às suas propriedades térmicas mais propícias à transferência de calor e às suas propriedades mecânicas mais capazes de suportar esforços de operação.

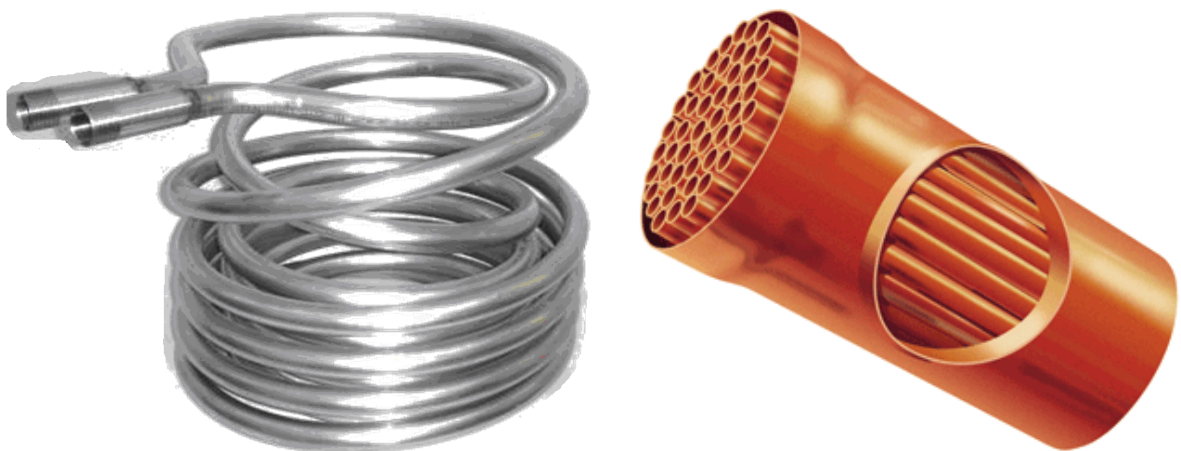


Figura 11 – Aço Inox e Cobre em permutadores de calor, [7]

A *Tabela 2* apresenta o coeficiente de transferência de calor por condução – k ($W/m.K$) – para alguns dos materiais metálicos utilizados na construção de permutadores de calor e alguns valores de referência, o Aço Inox e o Cobre Comercial, por exemplo.

Tabela 2 – Características de alguns materiais metálicos

Material	Coef. Trans. De Calor <i>k</i> (W/m . K)	Densidade ρ (kg/m³)
Alumínio Puro	237	2702
Alumínio Liga 2024-T6 (4,5% Cu, 1,5% Mg, 0,6% Mn)	177	2770
Alumínio Liga 195 – (4,5% Cu)	168	2790
Cobre Puro	401	8933
Bronze – (89% Cu, 11% Sn)	54	8780
Bronze Comercial – (90% Cu, 10% Al)	52	8800
Aço ao Carboono – AISI 1010	63,9	7832
Aço Inox – AISI 302	15,1	8055
Aço Inox – AISI 304	14,9	7900
Aço Inox – AISI 316	13,4	8238

Na grande maioria dos casos os materiais utilizados são ligas de vários elementos, como é o caso do *Aço Inox* que é uma liga de *Ferro* e *Crômio*, também ligado com *Níquel* e *Molibdénio*, conferindo-lhe assim propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns. A utilização de ligas metálicas é comum de modo a obter as propriedades mais adequadas a cada utilização.

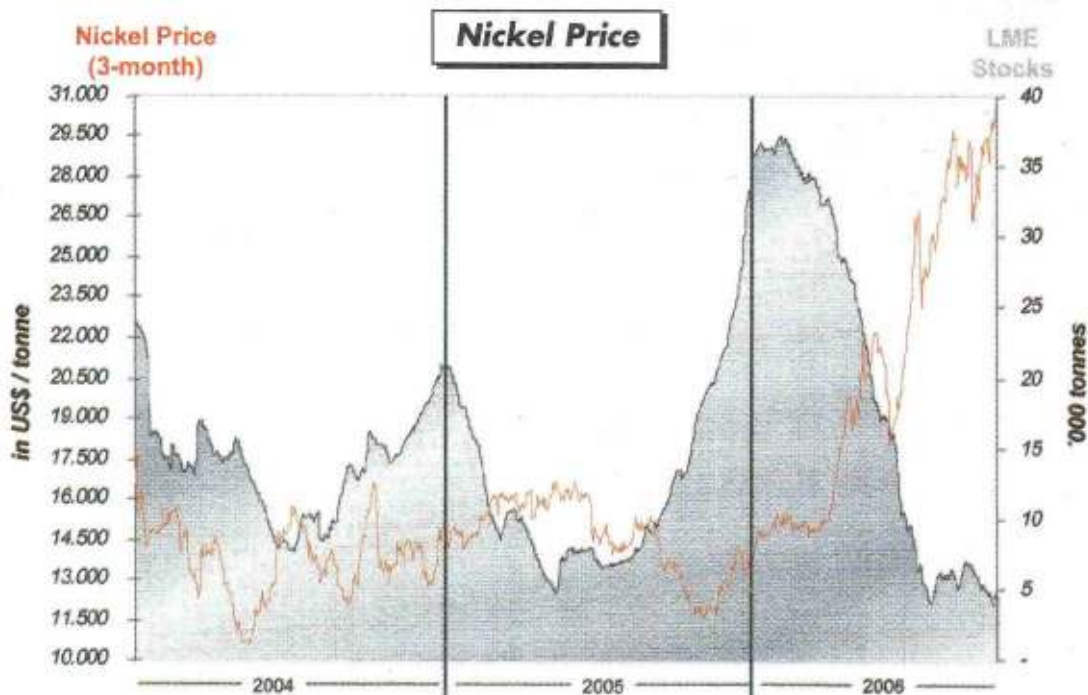


Figura 12 – Evolução de stock e preço do Níquel, [14]

Apesar da enorme vantagem da utilização de ligas metálicas, o problema surge quando a procura é muito elevada e a escassez de certos elementos pode encarecer o material. O gráfico da *Figura 12* mostra a evolução do preço e dos stocks do elemento Níquel. A importância desta análise prende-se com o facto de aproximadamente 65% do Níquel consumido ser empregue na fabricação de Aço Inox [14]. Neste momento o aspecto a focar é a redução de stock, resultado de um aumento significativo na procura de Aço Inox.

2.2.2. Materiais Poliméricos

Os materiais poliméricos têm encontrado cada vez mais aplicações, desde as de grande consumo às tecnicamente mais avançadas. As suas características físicas e químicas permitem obter uma considerável variedade de propriedades para os mais diversos fins. O seu preço e a sua elevada reciclabilidade, torna ainda mais apreciável a sua utilização, [15].

Os materiais poliméricos, para além da sua enorme diversidade têm outras vantagens quando comparados com os materiais metálicos. Estes, são mais leves e por isso mais fáceis de transportar (as caixas das asas do Airbus A380 utilizam compostos de fibras plásticas, o que reduz o peso da aeronave em cerca de 1,5 toneladas), mais fáceis de processar, apresentam maior resistência a ambientes corrosivos, etc.

Apesar do referido anteriormente também existem desvantagens, na aplicação de transferência de calor, as suas propriedades térmicas podem ser consideradas pouco apelativas. O plástico tem um coeficiente de transferência de calor bastante baixo, quando comparado com os materiais metálicos e as suas propriedades mecânicas variam drasticamente com a variação da temperatura a que estão sujeitos.

Uma análise térmica mostra que um permutador de calor com tubos poliméricos de parede fina e de pequeno diâmetro pode ir de encontro com as exigências de troca de calor de um sistema de aquecimento de água doméstico, devido ao aumento da área de transferência de calor [16].

Existem permutadores de calor imersos que permitem aquecer ou refrigerar a maioria dos produtos químicos corrosivos. Apesar de poderem ter características térmicas menos favoráveis do que os materiais metálicos, as propriedades mecânicas permitem uma durabilidade bastante superior.



Figura 13 – Permutadores de Calor Poliméricos, [17]

Para cada tipo de meio de funcionamento pode ser seleccionado um permutador de calor polimérico de material diferente, como mostram os seguintes exemplos, [17]:

- Para o aquecimento com vapores dos ácidos inorgânicos e orgânicos usados normalmente na laminagem a quente, usa-se o PVDF – *Fluoreto de Polivinilideno*;
- Para soluções de nevoeiro salino e soluções alcalóides, usa-se PP – *Polipropileno* ou PE – *Polietileno*;
- Para todas as soluções em que vapor é o meio de aquecimento deve ser utilizado PVDF – *Fluoreto de Polivinilideno*. Pode ser usado até uma temperatura de 138 °C e 2,5 bar;
- Para soluções ácidas sulfúricas usa-se PP – *Polipropileno* ou PE – *Polietileno*, acrescentando a vantagem de serem de mais baixo custo.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram alguns exemplos de permutadores de calor poliméricos, com diferentes configurações, dimensões e materiais para responder a diferentes necessidades.

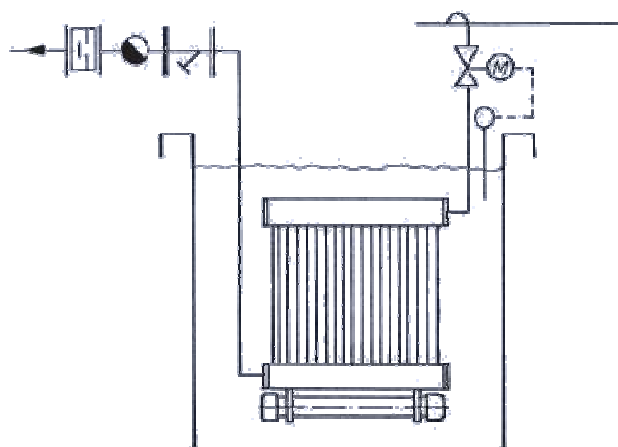


Figura 14 – Permutador de Calor e Esquema de Utilização, [17]



Figura 15 – Permutador em PVDF para utilização em Tanque Cilíndrico, [17]



Figura 16 – Permutador de Calor em PP para utilização vertical, [17]

3. CRITÉRIOS DE SELECÇÃO

3.1. ENQUADRAMENTO AMBIENTAL

Em menos de três décadas, os polímeros tornaram-se o grupo de materiais com mais soluções quando considerado o seu ciclo de vida, o que deixou de ser uma questão puramente ambiental para ser cada vez mais económica. É verdade que as aplicações de reutilização continuam a ser limitadas, mas têm um impacto mínimo no desempenho ambiental. Considerando o ciclo de vida do produto, torna-se relevante referir as características intrínsecas no que concerne a sua longa duração, a reciclabilidade mecânica, química e mesmo a valorização energética. Se estas saídas forem consideradas no seu conjunto, os materiais plásticos são, de longe, o grupo de materiais com mais saídas ambientais, [18].

À medida que os processos se optimizam e os mercados se modificam, os plásticos usados deixam de ser um problema de gestão de resíduos e passam a ser uma matéria-prima secundária com elevada procura. A par das indústrias de reciclagem industriais, surgem novas tecnologias e novos materiais baseados em reciclados (novos compostos de alto desempenho). A recuperação e valorização de polímeros cresce mais do que o consumo, cerca de 10% por ano, tendo sido, em 2005, na Europa 25+Noruega+Suiça, de 47%, [18].

É verdade que a indústria dos polímeros está dependente do petróleo, porém esta representa apenas cerca de 4% da sua utilização. Além disso, a relação de dependência tende a reduzir-se não só pela melhoria da eficiência material (melhor desempenho com menos material) mas também pelo aparecimento de polímeros não baseados no petróleo. Os novos materiais baseados em fontes renováveis (como o milho, por exemplo) já deixaram de ser especialidades ou curiosidades e estão a ganhar aplicações e mercados. De referir, como exemplos, o *PLA* (polímero de ácido láctico), um biopolímero obtido a partir do milho, reciclável e biodegradável, aplicado na produção de filmes e embalagens, [19]. A produção comercial de PE (polietileno) produzido a partir do etanol de cana do açúcar será iniciada em 2009, segundo, [20].

3.2. CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS

Será analisada a potencialidade dos materiais poliméricos para aplicação em permutadores de calor imersos, definindo as características que têm de oferecer.

Os polímeros oferecem uma enorme diversidade de características e propriedades, por isso a sua aplicabilidade   tão vasta. As propriedades dentro da oferta dos materiais poliméricos é altamente variada, como tal é necessário balizar as características fundamentais para cada aplicação.

Os cr terios básicos de selecção dos materiais poliméricos para aplicação em permutadores de calor são:

- Compatibilidade com água potável;
- Comportamento mecânico em meios quentes;
- Comportamento térmico na transferência de calor,
- Fabrico e custos.

A *Tabela 3* indica as condições que o polímero deve suportar sem cedências (ou cedências dentro dos limites de segurança), de modo a que se possa considerar adequado para aplicações em permutadores de calor imersos de base polimérica, para uso doméstico.

Tabela 3 – Requisitos dos materiais

Requisito	Valores Esperados
Potência Térmica	3000 W; 6000 W
Lado Quente	$T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Lado Frio	$T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Duração	Mínimo de 15 anos sem alterações mecânicas
Resistência � Pressão	$P = 15\text{ bar @ }60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Permeabilidade � �gua	Idealmente Não Higroscópico Dimensionalmente estável @ $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 15\text{ bar}$
Temperatura de Transição Vítreas	$T_g > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $T_g < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para polímeros amorfos
Amplitude Cíclica da Temperatura	Ciclos de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

As normas *National Sanitation Foundation (NSF)* são uma referência para a utilização de tubos poliméricos em aplicações sanitárias e alimentares.

A norma *NSF 61* apresenta uma lista dos materiais e produtos que se encontram com padrões para utilização com água potável. Um material ou um produto que se encontre com este padrão   compatível com água, minerais e produtos químicos que existem tipicamente na água de utilização doméstica. Não estabelecendo o desempenho para o gosto e o odor.

A norma *NSF 14* estabelece valores mínimos físicos, de desempenho, efeitos de saúde, garantia de qualidade e exigências para componentes plásticos. Os materiais aprovados por esta norma, estão aprovados pela *NSF 61*.

A *Tabela 4* apresenta uma lista de plásticos certificados pelas normas *NSF 61* e *NSF 14*, e quais os certificados para tubos de água a 82  C, [16].

Tabela 4 – Polímeros para utilização com água potável, [16]

Polímero	NSF 61	NSF 14	Tubos a 82 �C
<i>ABS – Acrylonitrile-Butadiene-Styrene</i>	�		
<i>AC – Acetal Copolymer</i>	�		�
<i>CPCV – Chlorinated</i>	�	�	�
<i>PVC – PolyVinylChloride</i>	�	�	
<i>PA – Nylon Polyamide</i>	�	�	�
<i>PB – PolyButylene</i>	�	�	
<i>PC – PolyCarbonate</i>	�		
<i>PE – PolyEthylene</i>	�	�	
<i>PP – PolyPropylene</i>	�		�
<i>PPE – PolyPhenylene Ether</i>	�		
<i>PEX – Cross linked Polyethylene</i>	�	�	�
<i>PS – PolyStyrene</i>	�		�

Tabela 5 – Resist ncia dos polímeros a alta temperatura, [16]

Polímero	Resist�ncia �gua a 82 �C para 10 anos
<i>FEP: perFluoro Ethylene-Propylene</i>	�
<i>PA: Nylon Polyamide</i>	�
<i>PEEK: PolyEther-Ether-Ketone</i>	�
<i>PEX: Cross linked Polyethylene</i>	�
<i>PFA: PerFluoro Alkoxy alkane</i>	�
<i>PLS: Polysulfone</i>	�
<i>PPA: PolyPhthalAmide</i>	�
<i>PPO: PolyPhenylene Oxide</i>	�
<i>PPS: PolyPhenylene Sulphide</i>	�
<i>PTFE: PolyTetraFluoroEthylene</i>	�
<i>PVDF: PolyVinylideneFluoride</i>	�

4. ANÁLISE TERMODINÂMICA

A análise termodinâmica de um permutador de calor imerso permite desenvolver um método comparativo entre a aplicação de materiais metálicos e materiais poliméricos, em termos do comportamento dos processos de troca de energia em aplicações definidas.

Transferência de Calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura.

Para completar a definição anterior é necessário referir a necessidade de existir um meio onde ocorra a diferença de temperatura.

A figura seguinte mostra os três tipos de transferência de calor.

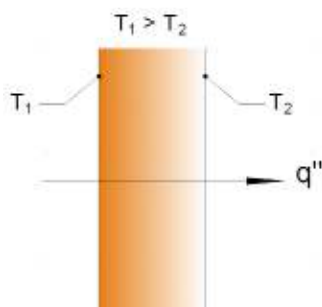


Figura 17 – Condução através de um sólido ou fluido estacionário

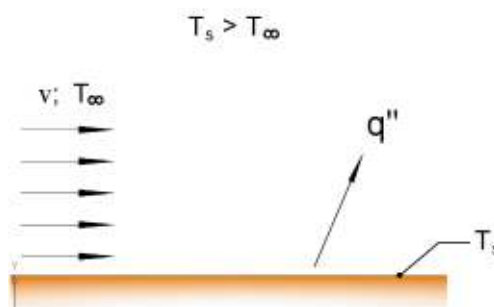


Figura 18 – Convecção de uma superfície e um fluido em movimento

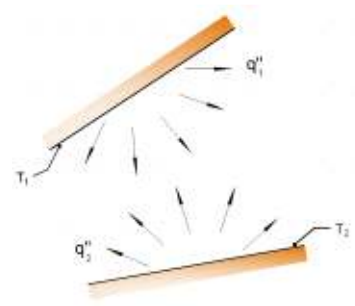


Figura 19 – Radiação entre duas superfícies

4.1. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Existem três mecanismos de transferência de calor: *Condução*; *Convecção*; *Radiação*. No estudo de permutadores de calor imersos, normalmente são consideradas unicamente duas formas de transferência de calor: *Condução* e *Convecção*. Isto acontece uma vez que o peso relativo do calor transferido por Radiação pode ser desprezado para as gamas de temperaturas envolvidas. É tanto mais desprezável quanto maior for o coeficiente de transferência de calor por convecção; quanto menor for a diferença de temperaturas entre o material e o fluido; quanto menor for a emissividade do material, [6].

4.1.1. Transferência de Calor por Condução

Este tipo de transferência de calor acontece quando existe um gradiente de temperaturas num determinado meio, que pode ser sólido ou líquido.

O efeito da *Condução* pode ser visualizado como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas, sobre um meio devido às interacções entre elas.

Para a Condução de Calor a equação que quantifica a transferência de calor é conhecida pela *Lei de Fourier*, e apresenta a seguinte forma para uma distribuição de temperatura num processo unidimensional:

$$q''_{cond} = -k \times \frac{dT}{dx} \quad [I]$$

O fluxo de calor $q''_{cond} \left(\frac{W}{m^2} \right)$ é a taxa de calor transferido na direcção x por unidade de área, perpendicular à direcção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$ nesta direcção.

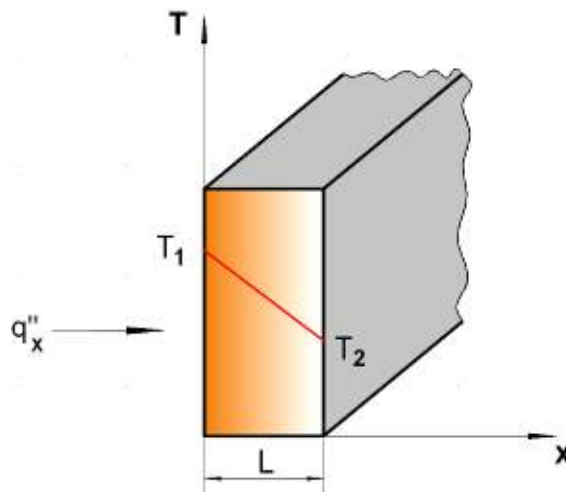


Figura 20 – Transferência de calor na direcção x

Para a figura anterior a *Lei de Fourier* pode ser escrita da seguinte forma:

$$q''_{cond} = k \times \frac{T_1 - T_2}{L} = k \times \frac{\Delta T}{L} \quad [II]$$

Notar que o calor transmitido por condução, $q_x(W)$, através de um plano com uma área A é dado por $q_x = q'' \times A$.

4.1.2. Transferência de Calor por Convecção

Este modo de transferência de calor é composto por dois mecanismos. Para além da energia transferida devido ao movimento aleatório das moléculas (difusão), a energia é também transferida pelo movimento do fluido.

A Convecção pode ser classificada de duas formas:

- *Convecção Forçada* – quando existe escoamento do fluido no meio exterior;
- *Convecção Natural* – escoamento provocado por forças internas, criadas pela diferença de densidade devido à diferença de temperatura do fluido, em pontos distintos.

A equação que define a convecção é conhecida pela *Lei de Newton do Arrefecimento* e é dada por:

$$q_{conv}'' = h \times (T_s - T_{\infty}) \quad [III]$$

O fluxo de calor convectivo, $q_{conv}'' \left(\frac{W}{m^2} \right)$, é proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido do meio, e ao coeficiente de transferência de calor por convecção $h \left(\frac{W}{m^2 \times K} \right)$.

4.1.3. Transferência de Calor por Radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que está a uma temperatura finita. Todas as superfícies emitem energia na forma de ondas electromagnéticas. Mesmo no vazio, existe troca de energia entre corpos a diferentes temperaturas.

O fluxo de calor emitido por uma superfície a uma dada temperatura é dada por:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T_s^4 \quad [IV]$$

Onde:

ε – Emissividade, $0 \leq \varepsilon \leq 1$

σ – Constante de *Stefan-Boltzman*, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \times K^4} \right]$

A expressão seguinte apresenta a diferença entre a energia térmica que é emitida e a que é absorvida.

$$q_{rad}'' = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad [V]$$

4.2. PERMUTADORES DE CALOR IMERSOS – PROJECTO

Para projectar ou prever o comportamento térmico de um permutador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor com grandezas tais como a temperatura, o coeficiente global de transferência de calor e a área total de superfície para a transferência de calor.

Dado que num permutador de calor a diferença entre temperaturas varia com a posição do fluido, é necessário utilizar uma equação que traduza a diferença média de temperatura. A mais apropriada é a média logarítmica da diferença de temperatura, podendo apresentar a taxa total de transferência de calor da seguinte forma:

$$q = UA \times \Delta T_{lm} \quad [VI]$$

- U – Coeficiente Global de Transferência de Calor;
- ΔT_{lm} – Média logarítmica da diferença de temperatura;

O *Coeficiente Global de Transferência de Calor* é definido em termos de resistência condutiva e convectiva entre fluidos separados por uma parede sólida podendo também ser isolada a área de transferência de calor, comum a ambos os factores de resistência. Este coeficiente pode ainda considerar um factor de incrustação, de modo a reflectir a perda de eficiência causada por deposição de impurezas nas paredes do permutador de calor. Apesar disso, este factor pode ser desprezado considerando que se trata, por exemplo, de um permutador de calor doméstico e que portanto funcionará com rigoroso plano de manutenção.

$$UA = \frac{n}{\frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \times \pi \times k_p \times L} + \frac{1}{h_o \times A_o}} \quad [VII]$$

Considerando a utilização de um fluido incompressível é uma boa aproximação à aplicação da conservação de energia, entre a entrada e a saída do permutador de calor, apresentada pela equação seguinte:

$$q = \dot{m} \times c_{p,f} \times (T_{in} - T_{out}) \quad [\text{VIII}]$$

Uma consideração importante, prende-se com o facto de se a variação de temperatura de um fluido for desprezável o comportamento do permutador de calor é independente da configuração específica, [5].

4.2.1. Hidráulica Aplicada a Permutadores de Calor Tubulares

Um ponto essencial no projecto de permutadores de calor é a caracterização do escoamento, uma vez que a transferência de calor é fortemente condicionada pelas condições deste.

Esta caracterização é normalmente conseguida através de números adimensionais, que têm uma interpretação física das condições de escoamento.

Número de Reynolds

O *Número de Reynolds* – *Re* – pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas.

Para valores elevados de *Re* as forças de inércia são dominantes, pelo contrário para valores baixos são as forças viscosas que dominam.

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad [\text{IX}]$$

Em que a *Velocidade Cinemática* é dada pela seguinte equação:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \times A_f} \quad [\text{X}]$$

O caudal \dot{m} é relativo ao escoamento num tubo, caso se trate de um banco de tubos $\dot{m} = \dot{m}_{total} / n$, uma vez que interessa determinar o tipo de escoamento no interior de cada tubo.

Importa também fazer a distinção entre a área frontal do tubo, que se relaciona com o escoamento do fluido e a área lateral do tubo que está relacionada com transferência de calor:

- A_f – Área frontal do tubo

$$A_f = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad [\text{XI}]$$

- A_c – Área lateral do tubo

$$A_c = \pi \times D \times L \quad [\text{XII}]$$

Número de Nusselt

O *Número de Nusselt* – Nu – representa o gradiente de temperatura na superfície e é utilizado como medida do calor transmitido por convecção na superfície.

O cálculo deste número varia consoante se trate de escoamento interior ou exterior e está dependente do valor de Re . Por isso as equações são apresentadas de seguida, em cada um dos subcapítulos correspondente.

Outros Números Adimensionais

Outros números adimensionais são utilizados no projecto de permutadores de calor imersos, como o *Número de Prandtl* – Pr , que pode está tabelado para várias condições de temperatura e pressão, e o número de *Rayleigh* – Ra , que é descrito no cálculo do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção – Exterior.

Geometria Equivalente

De modo a que geometria de escoamento seja equivalente, entre um tubo e n (*número finito*) tubos é necessário impor que a área frontal de escoamento é igual numa situação e noutra.

$$\frac{\pi \times D_1^2}{4} = n_{GE} \times \frac{\pi \times D_n^2}{4} \quad [\text{XIII}]$$

$$\Leftrightarrow n_{GE} = \left(\frac{D_1}{D_n} \right)^2$$

Perdas de Carga / Escoamento Equivalente

No projecto de um permutador de calor é importante determinar a queda de pressão, dado ser este o parâmetro que determina a potência necessária da bomba, que mantém o escoamento interior, [21].

No caso de um escoamento permanente ao longo de um tubo cilíndrico, de secção constante, a pressão diminui na direcção do escoamento devido ao atrito do fluido na parede do tubo.

A Perda de Carga em Linha – h_L – está relacionada com o factor de fricção – f – e pode ser expressa pela equação seguinte:

$$h_L = 4 \times f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{g} \quad [\text{XIV}]$$

O cálculo do factor de fricção é dependente do Número de Reynolds, e é calculado pelas equações de *Colebrook-White* e *Haaland*, apresentadas no sub capítulo seguinte.

Como exposto anteriormente o *Coeficiente Global de Transferência de Calor* – U – depende do número de tubos que é composto o permutador de calor – n .

De modo a que o escoamento seja equivalente, entre um tubo e n (*número finito*) tubos é necessário impor que a perda de carga numa situação e noutra, é igual. Dessa forma, pode-se escrever-se:

$$\Delta P_1 = \Delta P_n \quad [\text{XV}]$$

$$4 \times f_1 \times \frac{L_1}{D_1} \times \frac{v_1^2}{g_1} = 4 \times f_n \times \frac{L_n}{D_n} \times \frac{v_n^2}{g_n} + \Delta P_{\text{localizadas}}$$

O valor das perdas localizadas, nos colectores e nas entradas e saídas bruscas dos n tubos que compõem o banco de tubos do permutador de calor imerso, é bastante inferior às perdas de carga localizadas e por isso foram negligenciadas. Devendo ter em conta para a verificação experimental este ponto.

Substituindo v por $\frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times \rho \times D^2}$ e simplificando, vem:

$$n_{EE} \approx \left(\frac{f_1}{f_n}\right)^{1/2} \times \left(\frac{L_1}{L_n}\right)^{1/2} \times \left(\frac{D_n}{D_1}\right)^{5/2} \quad [\text{XVI}]$$

Nos cálculos em que se pretende analisar um comportamento de semelhança de escoamentos, a equação anterior deverá ser substituída na equação de UA , determinando no final de todo o procedimento de cálculo o valor de n exposto na equação anterior.

4.2.2. Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção – Interior

O coeficiente de transferência de calor por convecção no meio interior é dado pela equação seguinte:

$$h_i = Nu_i \times \frac{k_i}{D_i} \quad [\text{XVII}]$$

O cálculo do *Número de Nusselt* é dependente do *Número de Reynolds*, que caracteriza o escoamento como Laminar, Transição ou Turbulento. As seguintes expressões fazem a distinção, sendo que quando se trata de um escoamento de transição é utilizada a expressão correspondente ao escoamento turbulento, sendo esse aspecto referenciado como potencial origem de desvio no valor final.

- Escoamento Laminar – $Re < 2300$:

$$Nu_i = 4.36 \quad [\text{XVIII}]$$

- Escoamento Turbulento – $3000 < Re < 5 \times 10^6$:

$$Nu_i = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \times (Re_D - 1000) \times Pr_T}{1 + 12.7 \times \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \times \left(Pr_T^{2/3} - 1\right)} \quad [\text{XIX}]$$

O Factor de Fricção – f – é determinado pelas equações implícitas de *Colebrook-White*. Uma vez que se tratam de equações implícitas só podem ser resolvidas por métodos numéricos. A equação para o regime turbulento é a que implica cálculos mais extensos, mas vários autores propuseram alternativas, como por exemplo, *Haaland* que apresentou uma equação explícita para o cálculo do factor de fricção, com um erro de 0,22%.

- Escoamento Laminar – $Re < 2300$:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad [XX]$$

- Escoamento Turbulento – $Re > 2300$:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \times \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D_i}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re_D} \right] \quad [XXI]$$

Todas as propriedades físicas da água são valores tabelados para uma temperatura média:

$$\bar{T} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad [XXII]$$

Obtendo o resultado de h_i , de forma a ser aplicado na *equação [VII]*.

4.2.3. Rendimento de um Permutador de Calor Imerso

O rendimento de um permutador de calor imerso é dado pela relação entre a diferença de temperatura de entrada (T_{in}) e saída (T_{out}), e a diferença de temperatura de entrada (T_{in}) e a temperatura onde está imerso o permutador de calor (T_{tanque}).

$$\eta = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{tanque}} \quad [XXIII]$$

4.2.4. Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção – Exterior

Propriedades da água no exterior devem ser retiradas da tabela para a temperatura da água exterior – T_∞

O coeficiente de transferência de calor por convecção no meio exterior é dado pela equação seguinte:

$$h_o = Nu_o \times \frac{k_o}{D_o} \quad [XXIV]$$

O cálculo do *Número de Nusselt* para as mais comuns geometrias imersas (escoamentos exteriores), baseia-se em correlações empíricas. Para o caso de permutadores de calor imersos, com tubos circulares é utilizada a aproximação a um longo cilindro e a equação é dada da seguinte forma:

$$Nu_o = C_i \times Ra_D^{n_i} \quad [XXV]$$

Onde as constantes C_i e n são valores tabelados, dependendo do *Número de Rayleigh – Ra*, e que pelo artigo [10], para as condições de utilização de um permutador de calor imerso doméstico, as constantes tomam os valores:

- $C_i=0,513$
- $n_i=0,25$

Do artigo referido no parágrafo anterior vem que Ra é dado pela seguinte equação:

$$Ra = \frac{\rho_\infty^2 \times \beta_\infty \times c_{p,f_\infty} \times g \times D_o^3}{\mu_\infty \times k_\infty} \times \Delta T_{lm_{corr}} \quad [XXVI]$$

Sendo a média logarítmica da diferença de temperatura corrigida, dada pela equação [11]:

$$\Delta T_{lm_{corr}} = \Delta T_{lm} - \frac{Q \times \left(\frac{1}{h_i \times A_{c,i}} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \times \pi \times k_p \times L} \right)}{n} \quad [XXVII]$$

Onde a média logarítmica da diferença de temperatura, utilizada também para o cálculo da taxa total de transferência de calor – q, é calculada da seguinte forma:

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln\left(\frac{T_{out} - T_{tank}}{T_{in} - T_{tank}}\right)} \quad [XXVIII]$$

Obtendo o resultado de h_o , de forma a ser aplicado na equação [VII].

4.2.5. Procedimento de Cálculo

O projecto de Permutadores de Calor Imersos segue um determinado procedimento, que varia de acordo com os dados que são conhecidos e com os dados que se pretendem obter.

A descrição seguinte mostra a sequência a seguir no projecto de um permutador de calor imerso, em que o parâmetro a determinar será o comprimento do tubo ou do banco de tubos que o compõe – L . Fornecendo desta forma um parâmetro de comparação entre diferentes materiais para as mesmas condições.

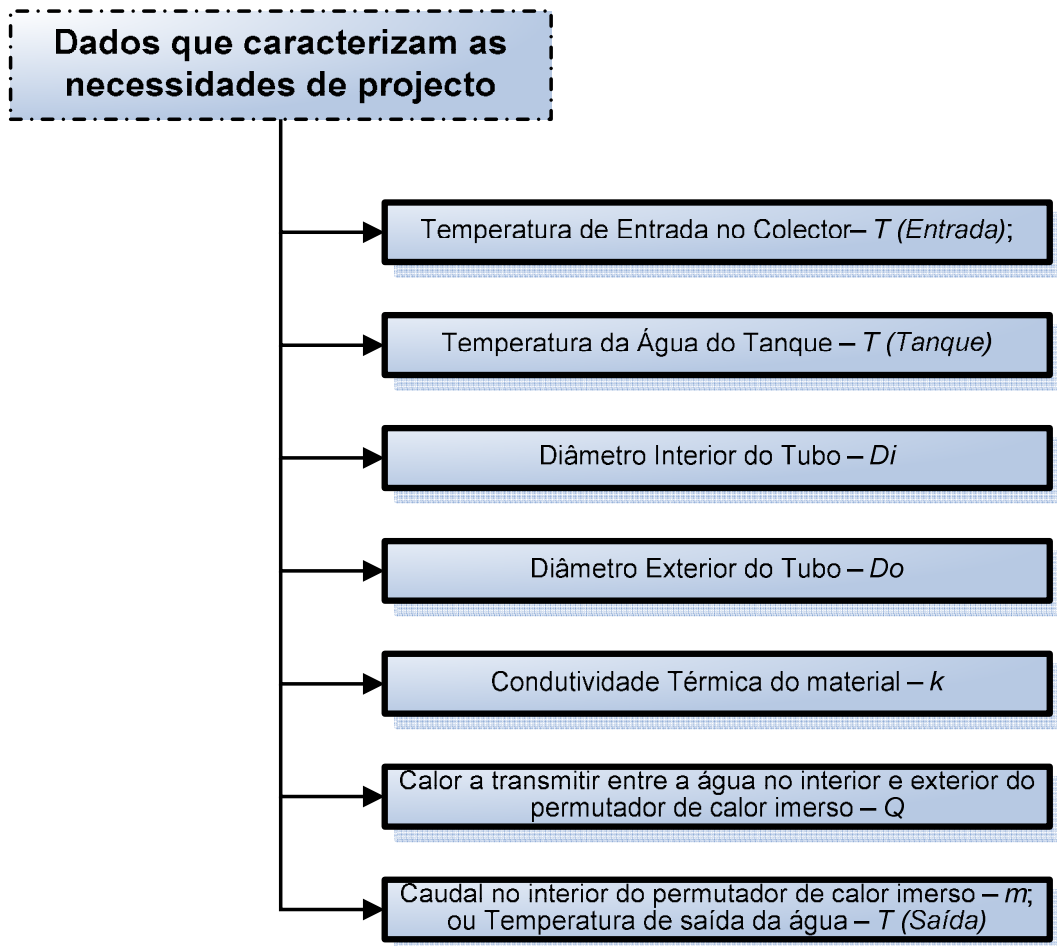


Figura 21 – Dados que caracterizam as necessidades de projecto

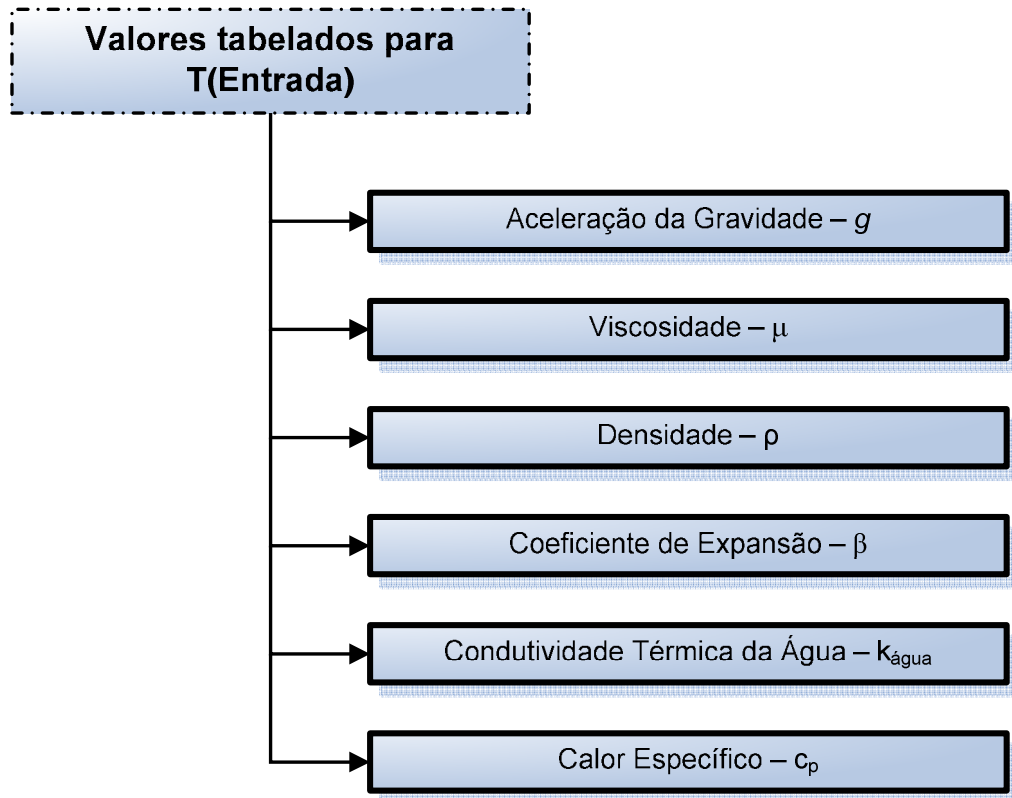


Figura 22 – Valores para $T(\text{Entrada})$

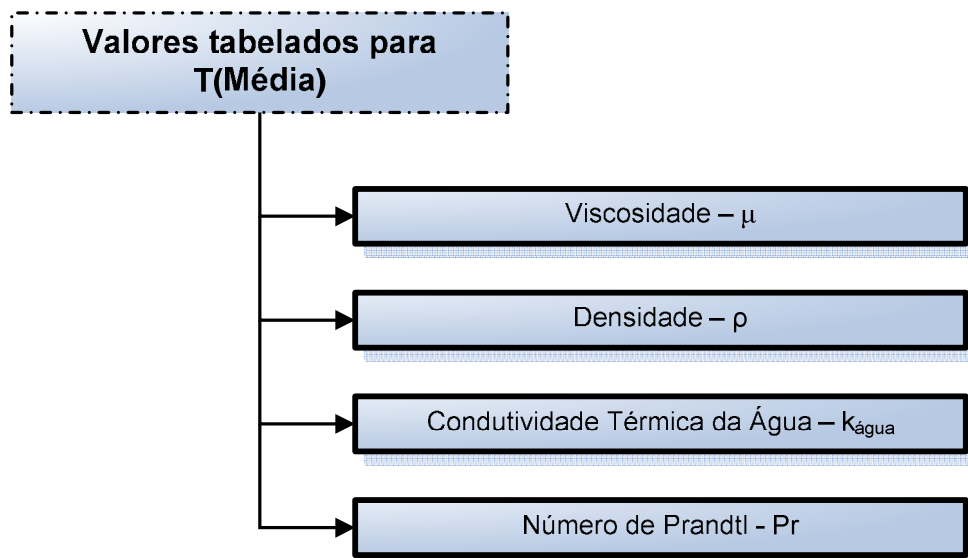


Figura 23 – Valores tabelados para $T(\text{Média})$

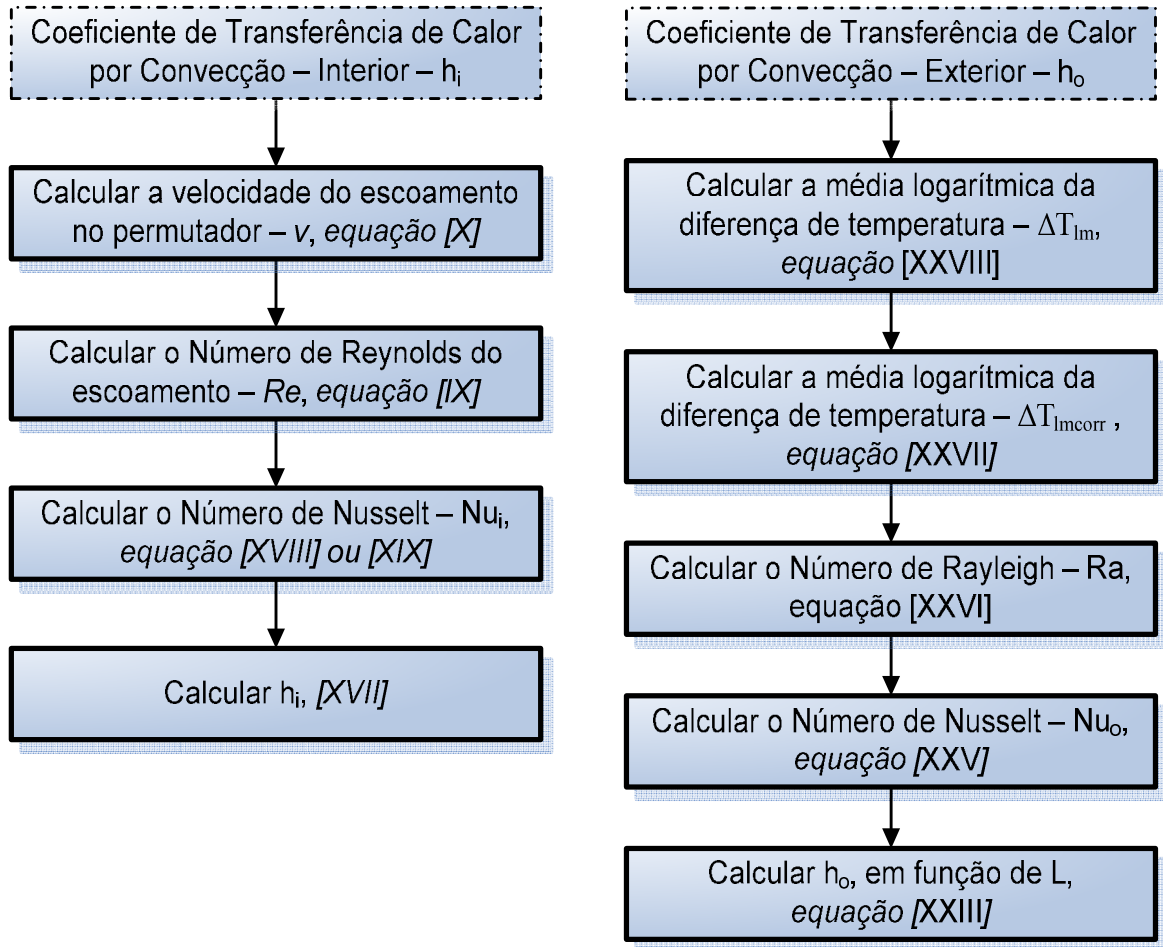


Figura 24 – Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção, Interior e Exterior

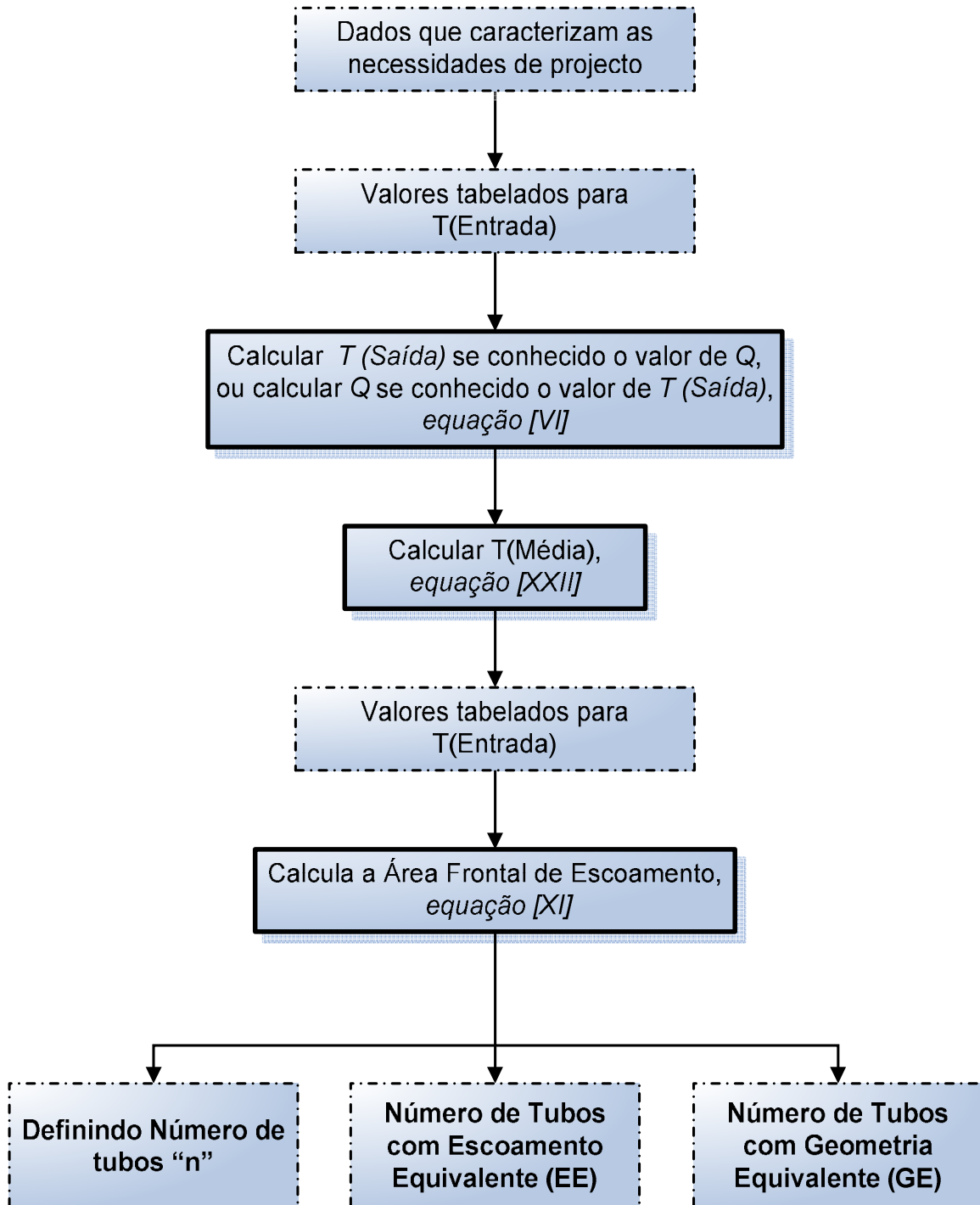


Figura 25 – Procedimento geral de cálculo

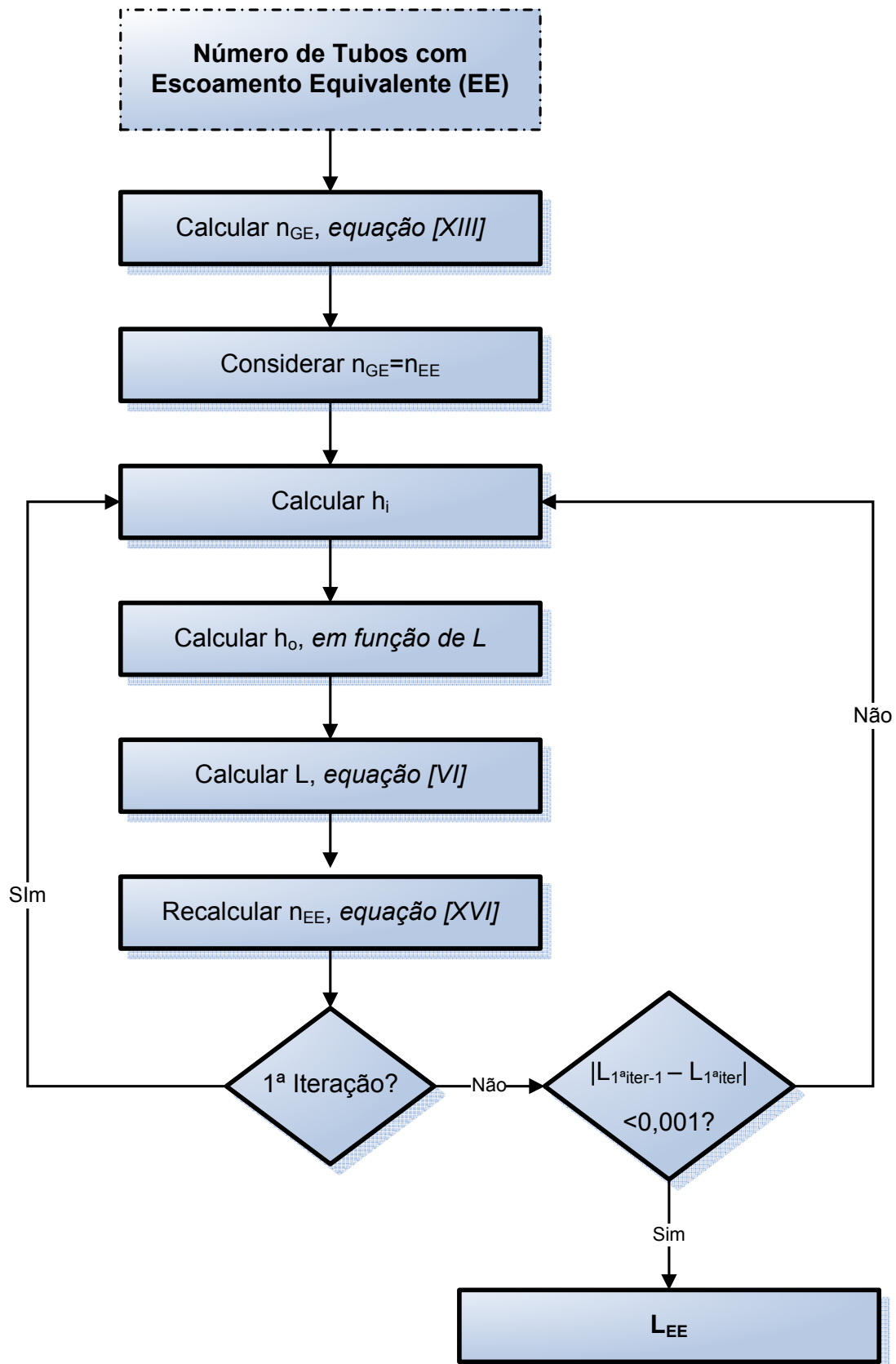


Figura 26 – Procedimento para calcular “n” tendo por base Escoamento Equivalente

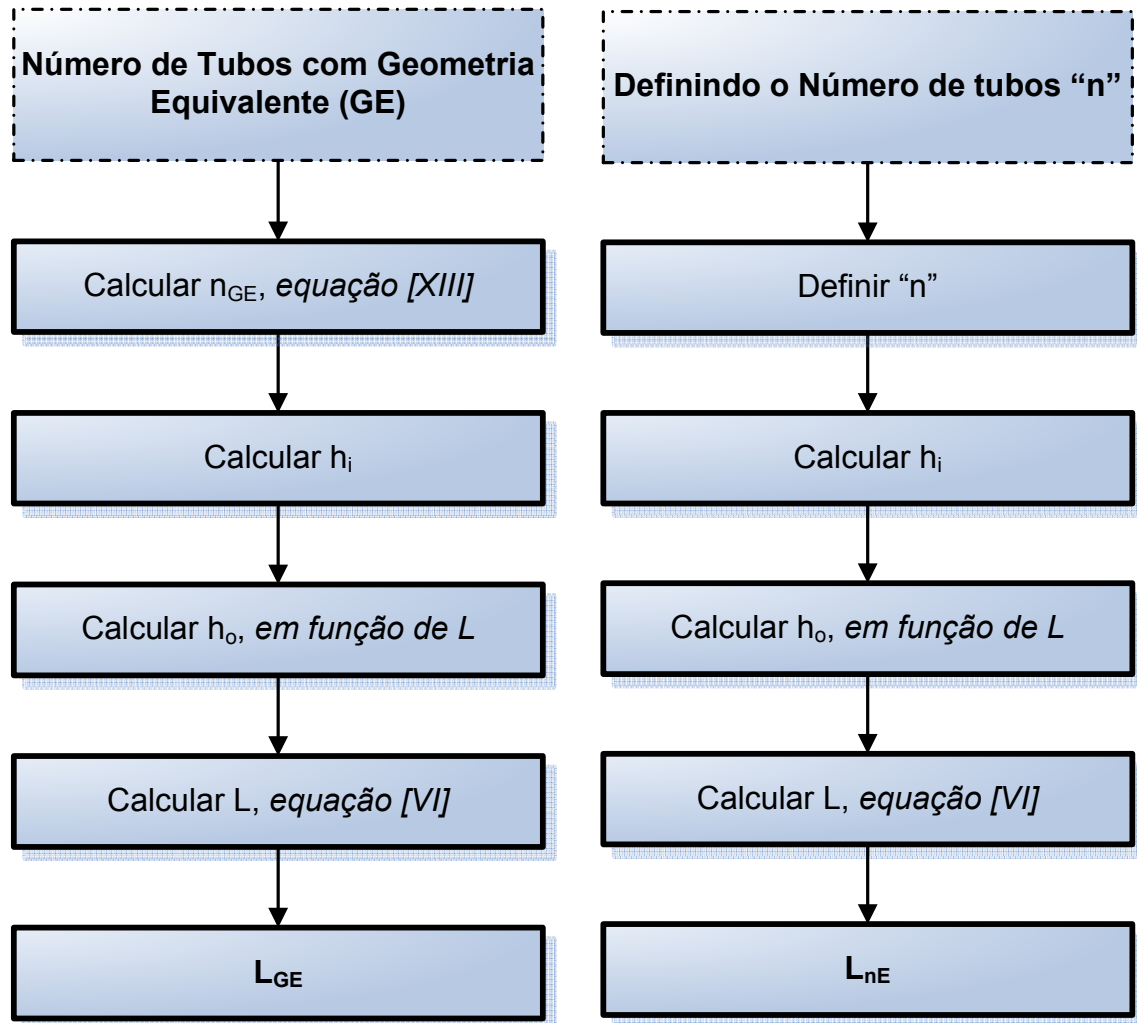


Figura 27 – Procedimento para calcular "n" tendo por base Geometria Equivalente e Definir "n"

4.2.6. Software PCi

Este procedimento de cálculo foi implementado num software – PCi – que permite obter de forma expedita a eficiência e o comprimento do tubo ou de um conjunto de n tubos, partindo das suas características físicas e das condições de operacionalidade.

As figuras seguintes apresentam as páginas que compõem o ambiente de trabalho do software, sendo o funcionamento descrito nos fluxogramas seguintes. Para além dessas páginas, existem também neste software a possibilidade de criar um novo projecto (*Menu/Novo*), abrir um já existente (*Menu/Abrir*), guardar o projecto em execução (*Menu/Guardar*) ou guardar como um projecto diferente (*Menu/Guardar Como*) e possibilita imprimir as propriedades definidas (*Menu/Imprimir*). Assim como também existe um menu de Ajuda, onde se pode esclarecer questões relativas à utilização (*Ajuda/Utilização*), propriedades (*Ajuda/Propriedades*), fontes (*Ajuda/Fontes*) e aos produtores do software (*Ajuda/Acerca de*).



Figura 28 – Página de Login

Figura 29 – Página de definição do Meio Interior e Exterior

Figura 30 – Página de definição do Material a Ensaar e a Comparar

PCI

Menu Ajuda

Meio Interior e Exterior Material a Ensaiar e Comparar Resultados Análise Econômica

Sair

Tubo Único

	L [m]	A [m ²]	h _i [W/m ² · K]	1/UA [W ⁻¹ ·K]	v [m/s]	Re [-]	ΔP [mm.c.a.]
Material a Ensaiar	11,73	0,36	1435,03	215,756	0,8950046	10889,58	1140,527966
Material a Comparar	49,34	0,81	4996,66	215,077	3,12623	20313,26	92221,053314

Apresentar Resultados

Banco de Tubos

	n [-]	Lme [m]	A [m ²]	h _i [W/m ² · K]	1/UA [W ⁻¹ ·K]	v [m/s]	Re [-]	ΔP [mm.c.a.]
Geometria Equivalente	3	18,18518	0,89	1730,99	216,021	1,042743	6771,087	9065,820686
Escoamento Equivalente	5	11,17512	0,9	1730,99	219,646	1,042743	6771,087	3106,769586
Definir - "n"	10	7,43762	1,21	518,17	219,823	0,312623	2031,306	899,060714

Geometria Equivalente - Banco com 3 tubos de Material a Comparar

Escoamento Equivalente - Banco com 5 tubos de Material a Comparar

Definir - "n" - Banco com 10 tubos de Material a Comparar

Apresentar Resultados

Figura 31 – Página de apresentação de Resultados

PCI

Menu Ajuda

Meio Interior e Exterior Material a Ensaiar e Comparar Resultados Análise Econômica

Sair

Definição de Custos

Material a Ensaiar 1 [€/m]

Material a Comparar 2 [€/m]

Tubo Único

	L [m]	[€]
Material a Ensaiar	11,73	11,73
Material a Comparar	49,34	98,68

Banco de Tubos

		L [m]	[€]
Geometria Equivalente - Banco com	3 tubos de Material a Comparar	18,18518	109,11
Escoamento Equivalente - Banco com	5 tubos de Material a Comparar	11,17512	110,85
Definir - "n"	10 tubos de Material a Comparar	7,43762	148,75

Apresentar Resultados

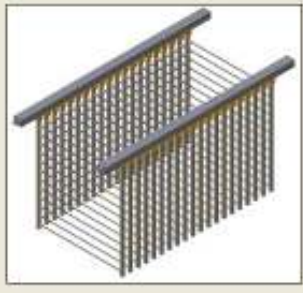


Figura 32 – Página de Análise Econômica

Os fluxogramas seguintes apresentam de forma esquemática o funcionamento do software. O que é necessário definir, valores de projecto que se têm de enunciar, decisões a tomar, etc.

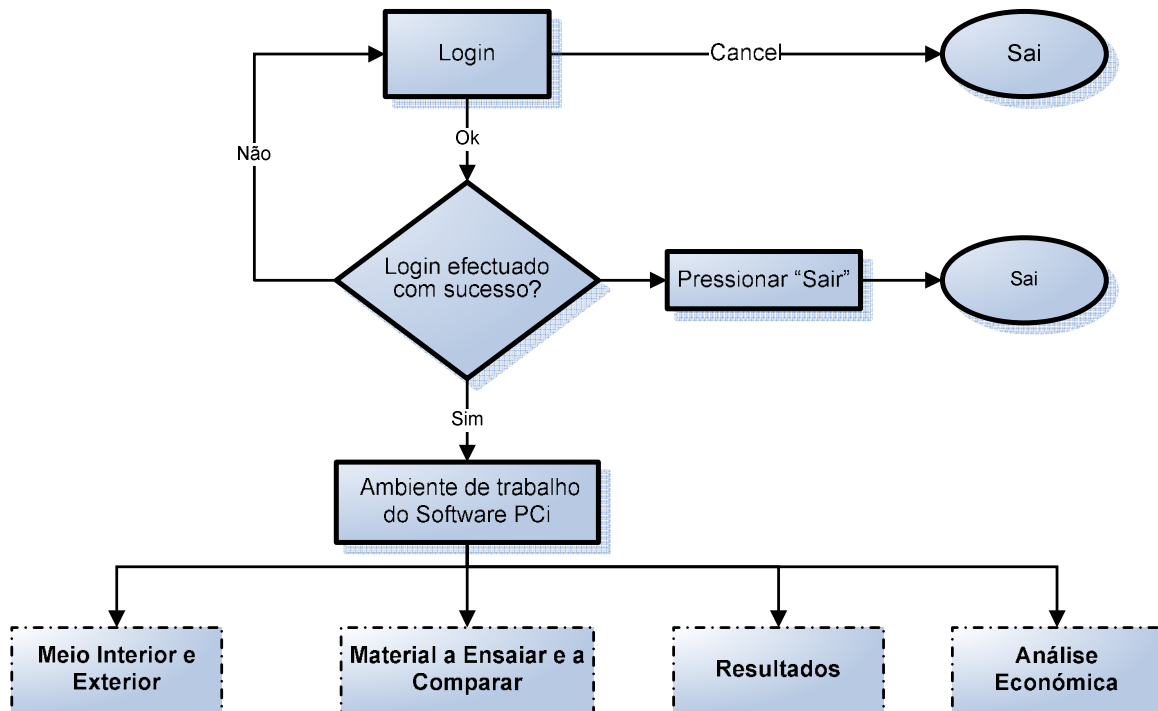


Figura 33 – Fluxograma de funcionamento da página “Login”

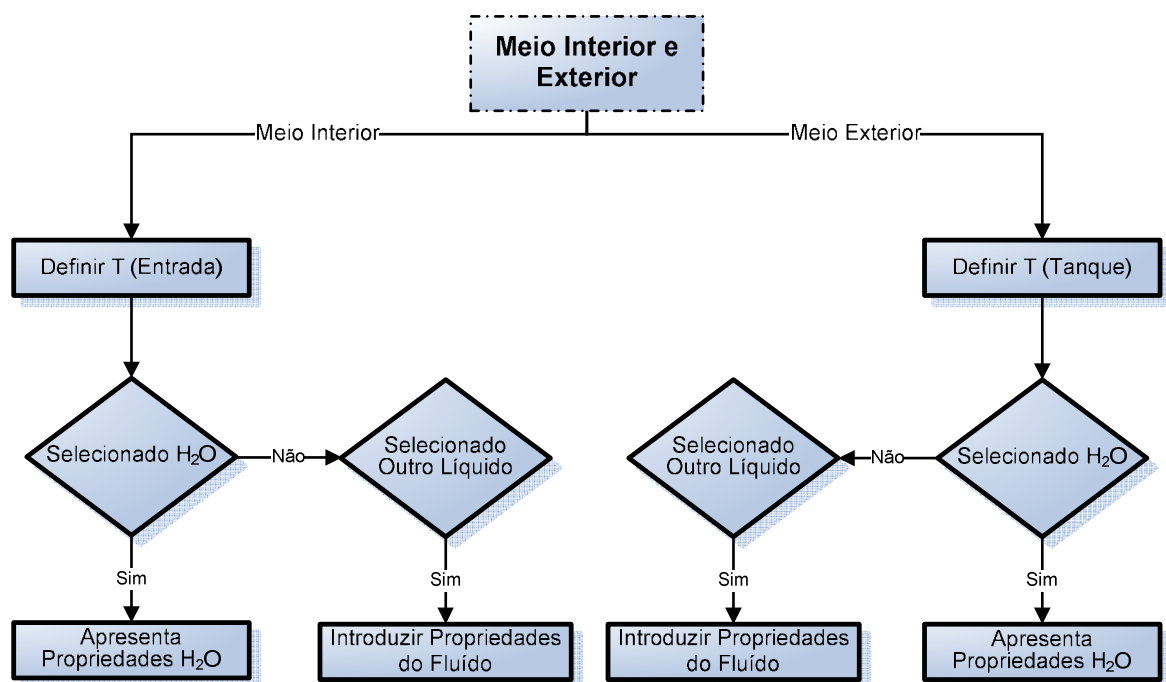


Figura 34 – Fluxograma de funcionamento da página “Meio Interior e Exterior”

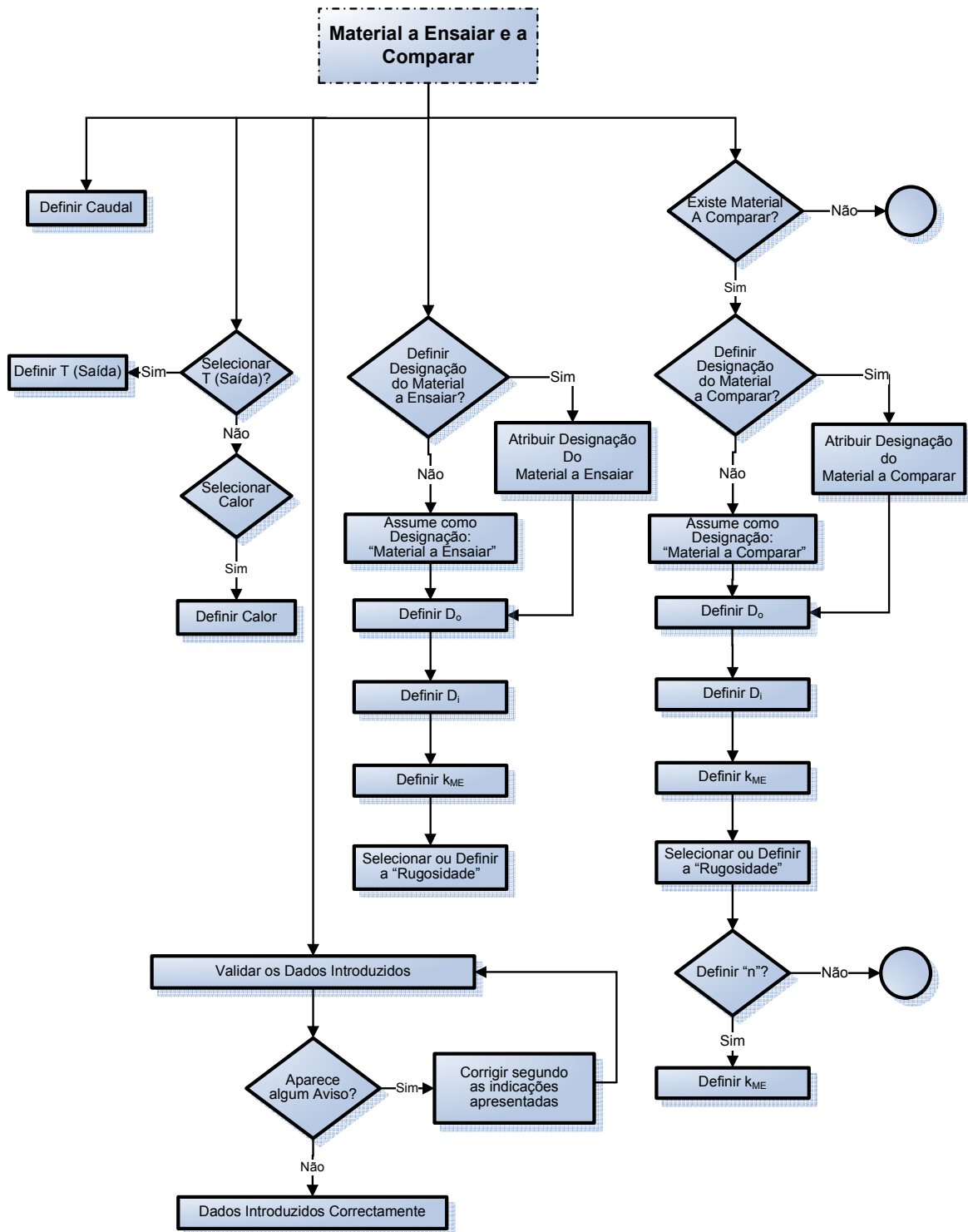


Figura 35 – Fluxograma de funcionamento da página “Material a Ensaial e a Comparar”

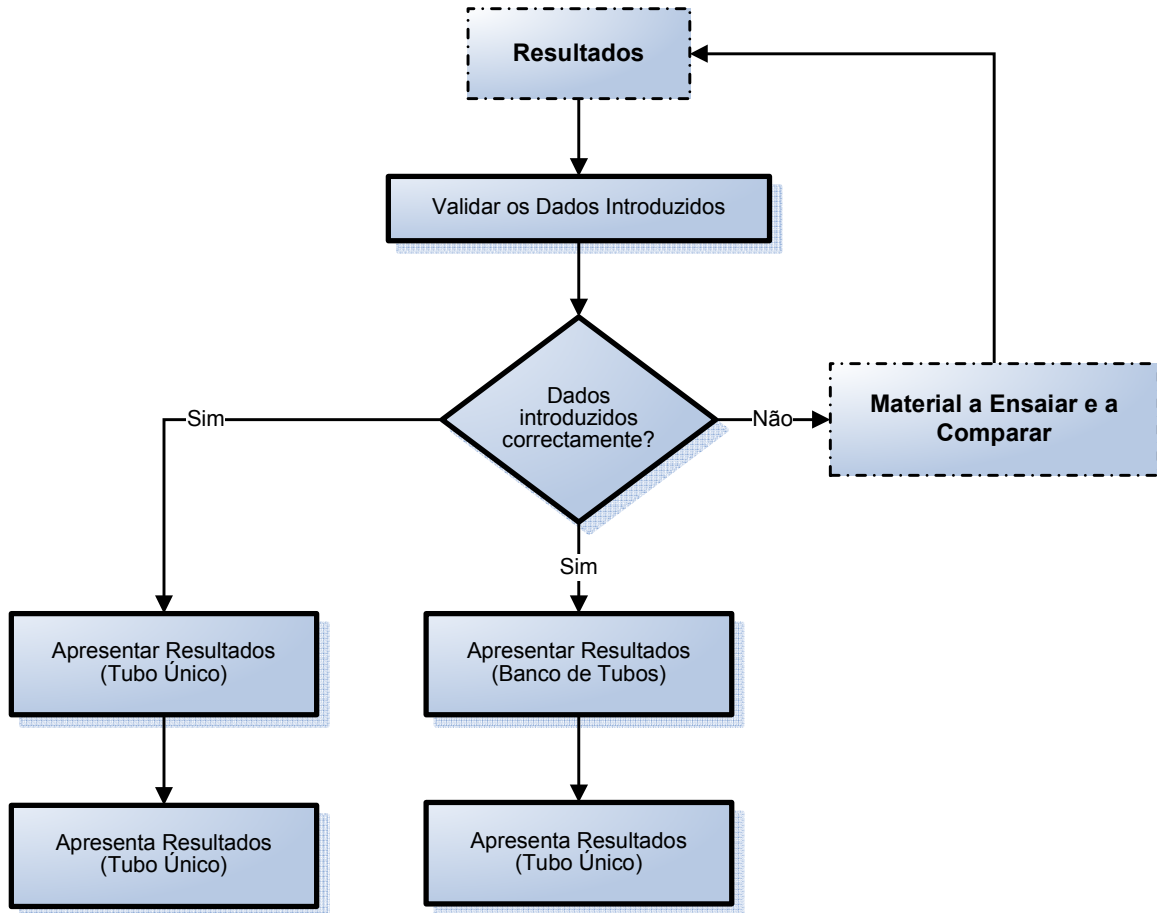


Figura 36 – Fluxograma de funcionamento da página “Resultados”

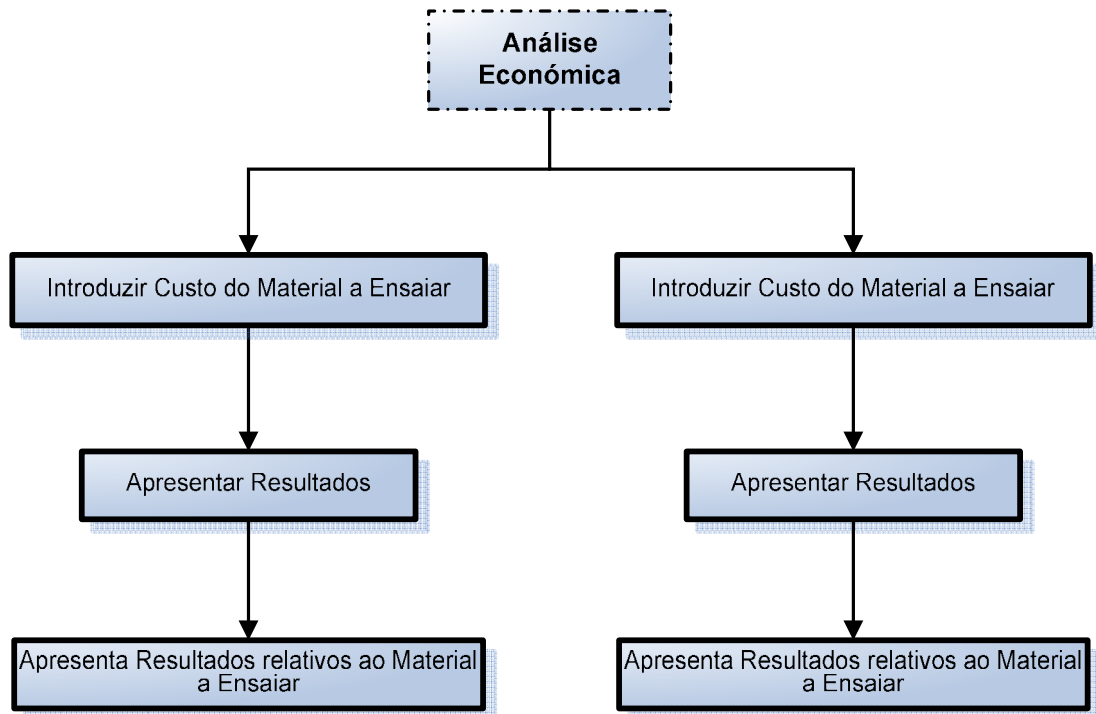


Figura 37 – Fluxograma de funcionamento da página “Análise Económica”

4.3. MODELO EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

A análise térmica apresentada anteriormente está baseada em equações conhecidas e amplamente verificadas em aplicações do género. Porém, este procedimento de cálculo, as aproximações e pressupostos assumidos carecem de verificação experimental.

4.3.1. Condições de Ensaio

Os ensaios seguiram propriedades previamente definidas e o projecto da bancada deverá garantir que estas se mantêm constantes durante o ensaio. A única propriedade que deverá variar é a temperatura do fluido no interior do permutador de calor, desde a sua entrada até à sua saída.

Identificação e caracterização de todos os elementos que compõem o modelo experimental:

- Bancada de ensaio e todos os acessórios;
- Material do tubo do permutador a ensaiar;
- Fluido a utilizar no interior do permutador de calor;
- Fluido a utilizar no exterior do permutador de calor;
- Caudal;
- Pressões;
- Temperatura do fluido à entrada do permutador de calor;
- Temperatura do fluido onde está imerso o permutador de calor;
- Temperatura do fluido à saída do permutador de calor, em medição permanente ao longo do ensaio.

A bancada de ensaio será descrita no sub capítulo 4.3.3.

As restantes propriedades são expressas em tabelas próprias para esse efeito com indicação da referência do ensaio. Esta será composta por um número de sequência e do ano de execução.

Tabela 6 – Condições de projecto – Verificação Experimental

Condições de Projecto	Ref.: 000/2007
Propriedades	Valor
Temperatura de Entrada, °C	
Temperatura do Tanque, °C	
Fluido no interior do permutador	
Fluido no exterior do permutador	
Caudal, l/min	

Tabela 7 – Propriedades do material polimérico – Verificação Experimental

Designação do Material a Ensaiar	Ref.: 000/2007
Propriedades	Valor
Físicas	
Densidade, kg/m ³	
Higroscopicidade, %	
Mecânica	
Tensão de Ruptura, MPa	
Tensão de Flexão, MPa	
Rugosidade	
Térmica	
Temperatura de Flexão a 1,8 MPa, °C	
Condutibilidade Térmica, W/m.°K	
Geométricas	
Diâmetro Exterior, m	
Diâmetro Interior, m	

**A cor diferente, estão as propriedades que são indispensáveis definir*

4.3.2. Procedimento de Aferição

A verificação experimental passa por definir as condições de projecto, e aplicá-las tanto no modelo matemático como num procedimento real, determinando matematicamente e experimentalmente os resultados e verificando o desvio entre o valor obtido de uma e outra forma.

Aplicando as condições de projecto num permutador de calor imerso com um comprimento conhecido, terá de se medir a temperatura à saída do permutador. No procedimento de cálculo será assumida a temperatura medida e calculado o comprimento do permutador.

O comprimento de tubo do permutador de calor utilizado no ensaio será então comparado com o valor do comprimento de tubo calculado pelo procedimento de cálculo apresentado.

Será criada uma tabela para guardar os resultados, tanto da análise experimental como da análise matemática, com a seguinte configuração:

<i>Ref.: 000/2007</i>			
Número do Ensaio	T (Saída) – Medida [°C]	T (Saída) – Calculada [°C]	Desvio
1			
2			
3			
4			
5			
6			
Somatório			

O procedimento seguinte passará por analisar o valor médio dos desvios, dado pelo *Somatório/Número de Ensaio*s.

Deverá ser imposto um valor de desvio máximo admissível, o qual considera erros de leitura, aproximações admitidas nos cálculos e efeitos do escoamento no interior do tubo do permutador.

Serão executadas, no mínimo, seis leituras para cada ensaio e executados, pelo menos, seis ensaios para diferentes valores de caudal (entre 3 e 20 [l/min], o mais equidistantes possível).

No final resultará um relatório onde constarão:

- As condições de ensaio;
- Um resumo relativo ao procedimento experimental;
- Resumo dos resultados obtidos;
- Comentários adicionais relativos aos ensaios e aos cálculos.

4.3.3. Bancada de Ensaio

A bancada de ensaios será composta por elementos que garantam as condições descritas nos capítulos anteriores, mantendo todas as propriedades estáveis durante o ensaio, variando apenas o valor da temperatura no interior do permutador de calor, desde a entrada até à saída.

Componentes da bancada de ensaio:

- 1 – Tanque revestido;
- 2 – Resistências;
- 3 – Sondas de temperatura;
- 4 – Controlo de temperatura;
- 5 – Componentes de ligação e suporte;
- 6 – Colectores;
- 7 – Bomba Hidráulica;
- 8 – Válvula reguladora de caudal;
- 9 – Tubo(s) poliméricos e metálicos (cobre e aço inox).

Posição 1 a 5

Os elementos mencionados nestas posições são os mesmos que os utilizados para a verificação experimental da análise mecânica.

Assim, toda a descrição destes componentes, desenhos, características técnicas, montagem, funcionamento, fornecedores e preços são apresentados no capítulo correspondente, referido anteriormente.

A diferença consiste no controlo da temperatura à saída do permutador, sendo utilizada para o efeito uma sonda de temperatura similar à utilizada no controlo do fluido do tanque, que vem acoplada às resistências.

Tabela 8 – Sonda de temperatura

Pos.	Designação	Quant.	Especificações	Preço [€] s\ IVA
1	Sonda de temperatura	2 [-]	PT100 ➤ Elemento sensor Classe A; ➤ Gama: -30 a +400°C; ➤ Construção em Aço Inox.	71

Posição 6

Os colectores de entrada e saída dependem do material a ensaiar. Caso o permutador de calor a ensaiar seja de um material metálico não será necessário um colector, dado que se pretende ensaiar o permutador de calor composto por um só tubo. Neste caso, as ligações serão feitas directamente à entrada e saída do tubo que compõe o permutador de calor.

Caso o permutador de calor a ensaiar seja polimérico, composto por um tubo único ou vários em paralelo é necessário um colector à entrada e outro à saída, como mostra a Figura 38. Este permite colocar de 1 a 70 tubos, considerando que se não levar o máximo de tubos será necessário tamponar os restantes.



Figura 38 – Colector para permutador polimérico [22]

Posição 7 e 8

A bomba hidráulica é aplicada à entrada do permutador, a fim de promover a circulação do fluido no interior do permutador de calor. Em conjunto, será montada uma válvula reguladora de caudal, que garantirá a circulação do fluido com um caudal constante.

Tabela 9 – Bomba hidráulica e Válvula reguladora de caudal

Pos.	Designação	Quant.	Especificações	Preço [€] s\ IVA
1	Bomba hidráulica	1 [-]	Bomba eléctrica, 220V; Controlo de pressão	639
2	Válvula reguladora de caudal	1 [-]	Válvula reguladora de caudal com estrangulamento variável	42

Posição 9

Os materiais terão de ser seleccionados, segundo os critérios já apresentados no capítulo referente, sendo possível o ensaio de permutadores de calor de qualquer material polimérico ou metálico.

Os tubos terão de ser colocados na forma de enrolamento, acoplados ao sistema (composto pelos elementos da posição 1 à 8). Caso se trate de um permutador composto por vários tubos em paralelo é necessário criar um colector para a entrada e saída do fluido, sendo as restantes ligações feitas através dos colectores.

4.3.4. Caderno de Encargos

O projecto apresentado está englobado no âmbito da análise do comportamento térmico de tubos poliméricos, quando sujeitos a condições de temperatura e meios bem definidos.

A montagem da bancada deverá seguir os procedimentos descritos no capítulo referente à análise mecânica, sendo as ligações feitas por técnicos especializados, quer no caso dos tubos metálicos quer nos tubos poliméricos, com atenção às diferenças apresentadas anteriormente.

4.4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Através do procedimento de cálculo apresentado e do software que o implementa – PCi – foram aplicadas algumas condições de projecto e foram verificados os resultados. Estes valores carecem de validação experimental, como descrito no capítulo anterior.

Os valores obtidos permitem em comparação com alguns resultados apresentados no artigo, [10]. Permite assim verificar a tendência dos valores e para além disso, permite verificar o comportamento dos diferentes materiais.

4.4.1. Condições de projecto

Foram consideradas as características de três materiais, um polimérico e dois metálicos.

O material polimérico é o *PA66*, uma poliamida com grande resistência mecânica e de baixa higroscopicidade.

Os materiais metálicos mais utilizados actualmente em permutadores de calor, são o *Cobre Comercial* e o *Aço Inox*.

Tabela 10 – Condições de projecto

Condições de Projecto	
Temperatura de Entrada, °C	20
Temperatura do Tanque, °C	60
Fluido no interior do permutador	H ₂ O
Fluido no exterior do permutador	H ₂ O
Calor, W	3000 e 6000
Caudal, l/min	3 a 20

Os materiais metálicos são:

(1) – *Commercial Copper (90% Cu, 10% Al - ASTM B148)*

(2) – *Stainless Steel – AISI 304*

Tabela 11 – Propriedades dos materiais metálicos, [23]

Propriedades	Valor (1)	Valor (2)
<i>Físicas</i>		
Densidade, kg/m ³	8800	7900
<i>Mecânica</i>		
Tensão de Ruptura, MPa	517	505
Rugosidade	$1,5 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-5}$
<i>Térmica</i>		
Temperatura de fusão	1293	1670
Condutibilidade Térmica, W/m.°K	52	15
<i>Geométricas</i>		
Diâmetro Exterior, m	12,7	12,7
Diâmetro Interior, m	9,7	9,7

Tabela 12 – Propriedades do material polimérico, [23]

Modified Nylon Series PA66	
Propriedades	Valor
<i>Físicas</i>	
Densidade, kg/m ³	1480
Higroscopicidade, %	0,6
<i>Mecânica</i>	
Tensão de Ruptura, MPa	110
Tensão de Flexão, MPa	168
Rugosidade	$5,829 \times 10^{-7}$
<i>Térmica</i>	
Temperatura de Flexão a 1,8 MPa, °C	200
Condutibilidade Térmica, W/m.°K	0,15
<i>Geométricas</i>	
Diâmetro Exterior, m	6
Diâmetro Interior, m	5,2

4.4.2. Apresentação de Resultados

Serão apresentados resultados dos cálculos com as condições descritas anteriormente, fazendo variar uma propriedade e analisando o efeito no comprimento de tubo(s) necessário para se obterem os requisitos impostos em termos de transmissão de calor.

Tabela 13 – Resultados para um tubo polimérico

Tubo Polimérico, Caudal = 4 [l/min]			
Potência [W]	Comprimento [m]	Temperatura à Saída [°C]	Rendimento [-]
3000	20,21	30,8	27
6000	49,3	41,5	53,8

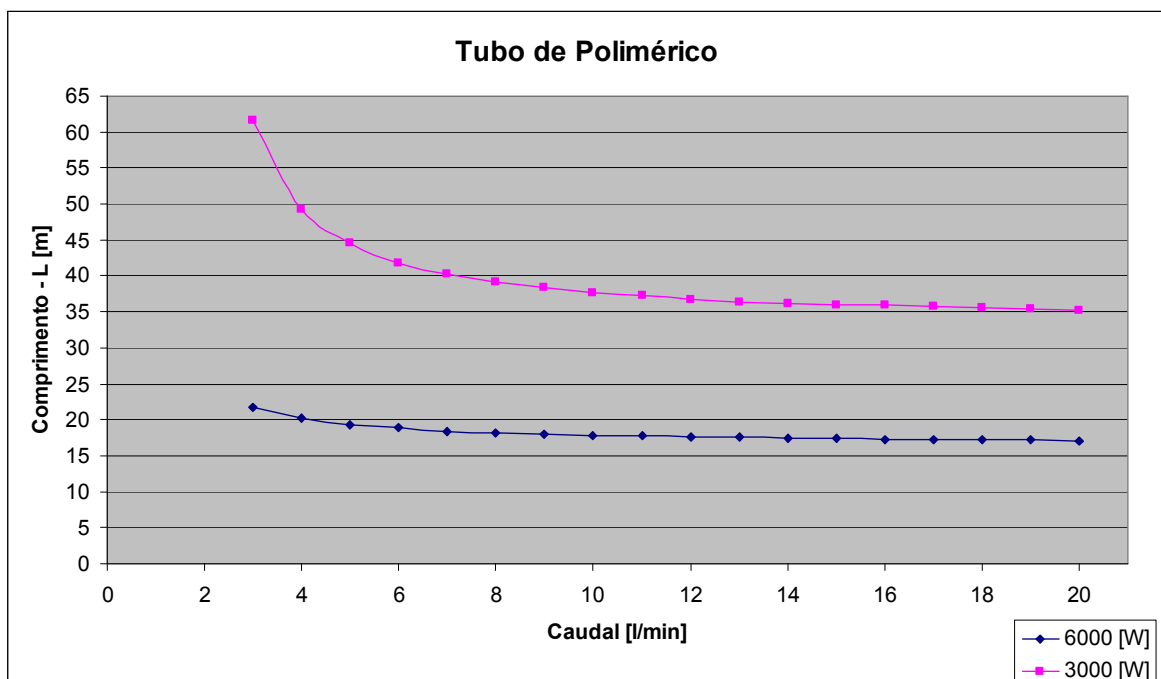


Figura 39 – Caudal/Comprimento para um Tubo Polimérico

Tabela 14 – Resultados para um tubo de cobre

Tubo Cobre, Caudal = 4 [l/min]			
Potência [W]	Comprimento [m]	Temperatura à Saída [°C]	Rendimento [-]
3000	4,81	30,8	27
6000	11,73	41,5	53,8

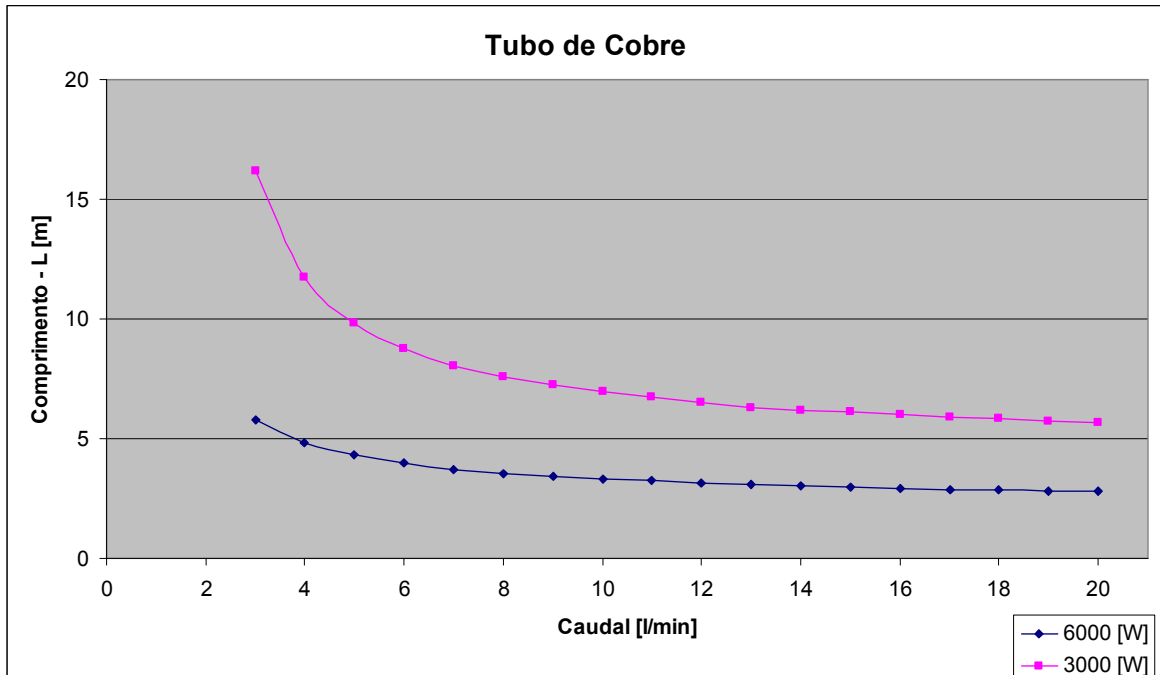


Figura 40 – Caudal/Comprimento para um Tubo de Cobre

O gráfico seguinte apresenta o comportamento de um permutador de calor composto por um único tubo, para cada um dos três tipos de materiais em análise e para uma troca de calor de 6000 [W].

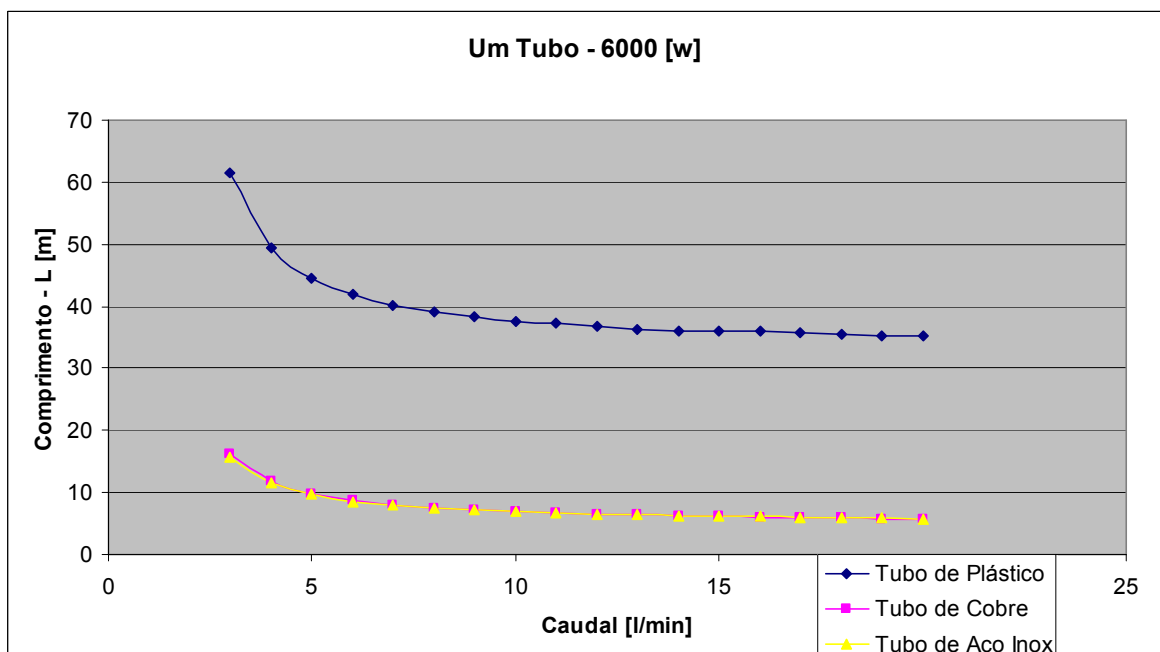


Figura 41 – Caudal/Comprimento para um Tubo Polimérico, de Cobre e de Aço Inox

O objectivo deste projecto é comparar o comportamento de um permutador de calor composto por um único tubo de um material metálico (cobre ou aço inox), com um permutador de calor composto por vários tubos de material polimérico. A determinação do número de tubos poliméricos tem por base garantir um escoamento equivalente, isto é, uma perda de carga semelhante num e noutro caso, como apresentado pela *equação [XVI]*.

O gráfico seguinte apresenta os resultados para um permutador de um único tubo de cobre e seis tubos poliméricos, com uma troca de calor de 6000 [W].

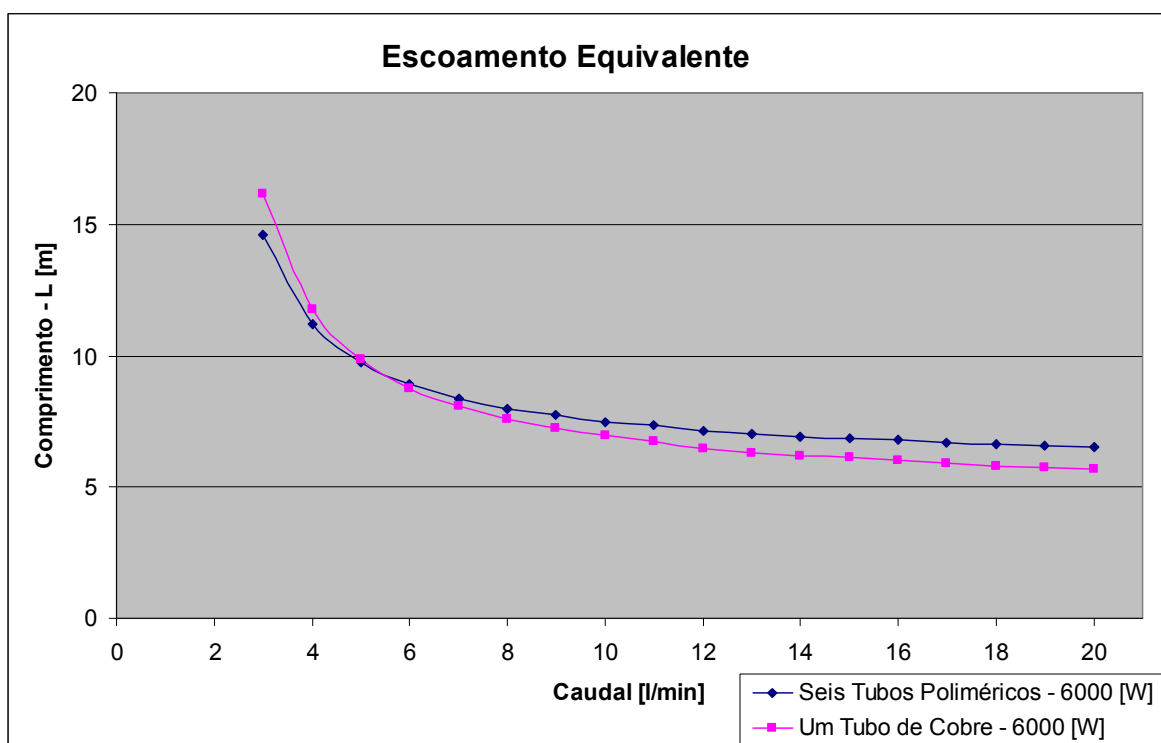


Figura 42 – Caudal/Comprimento com Escoamento Equivalente

Análise semelhante pode ser feita para a comparação, tendo por base garantir uma geometria equivalente, isto é, a área frontal de escoamento do tubo metálico deve ser igual ao somatório da área frontal de escoamento de vários tubos poliméricos, como apresentado pela *equação [XII]*.

O gráfico seguinte apresenta os resultados para um permutador de um único tubo de cobre e seis tubos poliméricos, com uma troca de calor de 6000 [W].

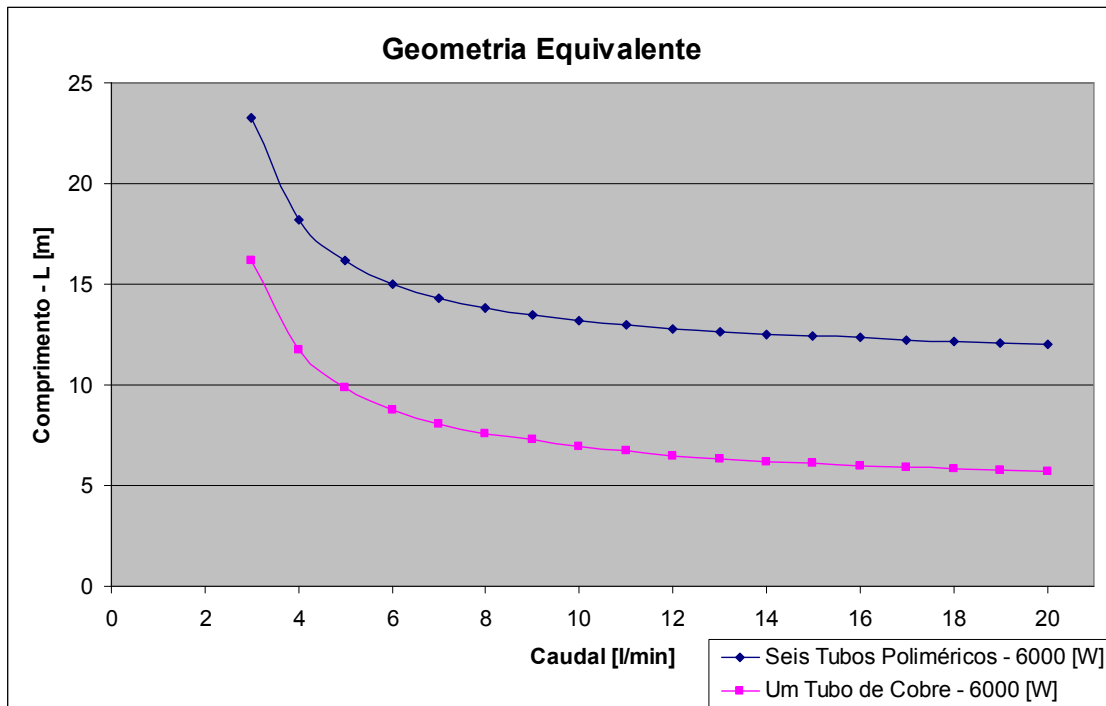


Figura 43 – Caudal/Comprimento com Geometria Equivalente

A variação do caudal tem uma forte influência sobre o rendimento do permutador de calor, como também foi apresentado anteriormente. O gráfico seguinte apresenta a evolução do rendimento do permutador, para uma troca de calor de 6000 [W].

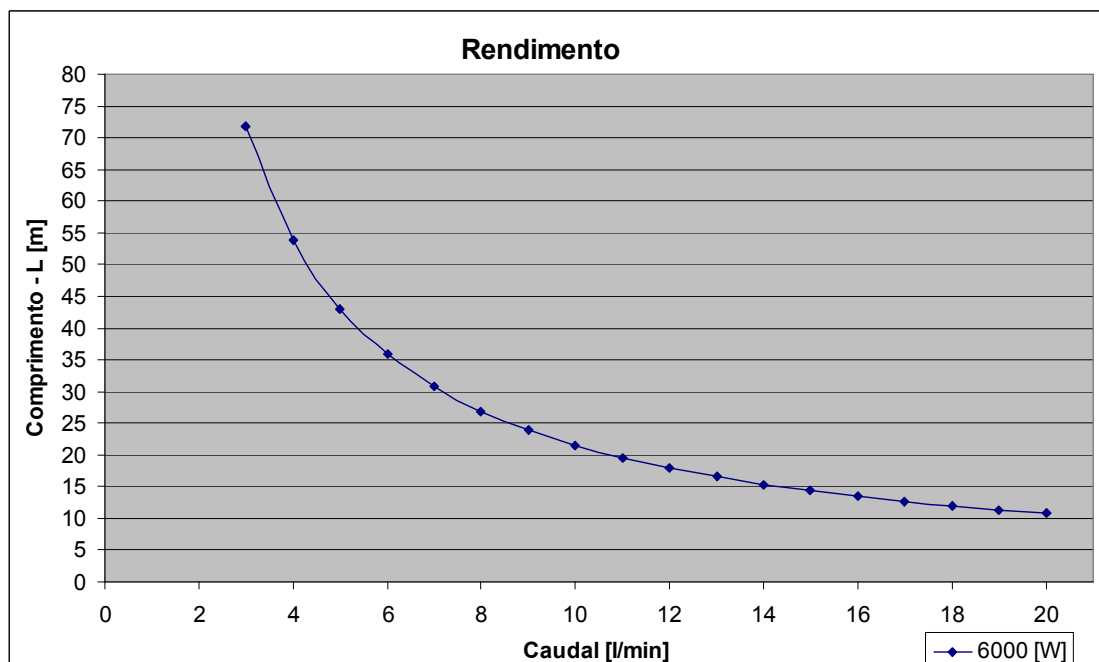


Figura 44 – Caudal/Comprimento, evolução do rendimento

5. ANÁLISE MECÂNICA

A análise mecânica refere-se ao comportamento, a longo prazo, dos tubos poliméricos sob condições físicas específicas. É necessário determinar qual a degradação que o tubo sofrerá quando sujeito a determinadas condições num prazo alargado.

Para determinar valores congruentes e equiparáveis a outros já obtidos, é necessário utilizar procedimentos que possuam os mesmos fundamentos. Como tal, foram utilizadas normas internacionais, tais como:

ISO/DIS 9080:1997(E) – *Plastics piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation*;

ISO 1167-1 – *Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure*

Part 1: General Method

ISO 1167-2 – *Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure*

Part 2: Preparation of pipe test pieces

O uso apropriado de tubos de plástico sob pressão é antes de mais determinado pelo comportamento do material de que é construído, sob a aplicação de uma carga, tendo em conta condições de serviço ampliadas.

É comum expressar este comportamento por meio da pressão hidrostática (radial), como mostra a *Figura 45*, onde se espera que os tubos de plástico não sofram degradação estrutural durante 50 anos, sujeitos a uma temperatura ambiente de 20 °C usando água como meio de teste interno. O meio ambiente exterior pode ser água ou ar.

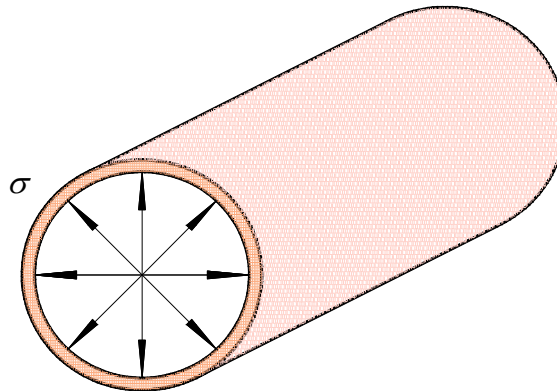


Figura 45 – Pressão Radial (Hoop Stress)

Em certos casos é necessário determinar o valor da pressão radial a períodos de tempo mais curtos, a temperaturas superiores, ou ambas. O método apresentado por esta norma foi desenvolvido a pensar nestas duas situações. O valor obtido irá indicar o limite inferior preditivo (*LPL – lower prediction limit*), que representa o limite inferior de confiança do valor de pressão radial previsto, que pode causar ruptura à temperatura indicada e no final do tempo estabelecido.

5.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE TUBOS POLIMÉRICOS

O procedimento descrito pela *Norma ISO/DIS 9080:1997 [26]*, utiliza a extrapolação através de dados obtidos a diferentes temperaturas, analisadas pela análise múltipla de regressão linear (*Standard Extrapolation Method – SEM*).

Esta análise múltipla de regressão linear é baseada em modelos descritos normalmente por $\log_{10}(\text{pressão})$ vs $\log_{10}(\text{tempo})$.

De seguida será exposto o procedimento da referida norma, que será utilizado neste estudo.

O método utilizado fornece bases para a interpolação e a extrapolação da pressão de ruptura operando em condições diferentes dos convencionais, 50 anos a 20 °C.

É essencial que o meio utilizado para pressurizar o tubo não tenha efeitos adversos sobre o mesmo. No geral, água é considerado um meio bastante adequado.

De uma forma básica o método permite dar resposta a duas formas de colocar o problema:

- Qual a máxima pressão que um dado tubo pode resistir, a uma dada temperatura, para um tempo definido?
- Quanto tempo resiste um tubo quando sujeito a uma determinada pressão, a uma dada temperatura?

Assim, o procedimento passa por verificar qual a pressão máxima suportada por um provete imerso à temperatura de ensaio, num tempo não superior a uma hora. Posteriormente vão ser aplicadas, de forma escalonada, pressões inferiores nos restantes provetes de modo a que o tempo de rebentamento seja gradualmente superior. Quanto menor for o espaçamento entre os valores de pressão, menores serão os intervalos de tempo obtidos para um rebentamento a uma determinada pressão e outro a outra pressão. As restantes características relativas à obtenção de valores é descrita posteriormente, no capítulo correspondente aos dados a recolher.

O Método Normalizado de Extrapolação descreve o procedimento para estimar o limite inferior preditivo caso exista ponto de inflexão – ‘*knee point*’ – o qual demonstra a transição entre a ruptura frágil e dúctil (será posteriormente caracterizada), ou não.

O resultado final para um tubo de um determinado material será o limite inferior preditivo (a 97.5% do nível de probabilidade) da pressão radial, expressa pela pressão radial para um determinado tempo e uma determinada temperatura.

A pressão exercida no interior do tubo (P [bar]) está relacionada com a pressão radial no interior do tubo (σ [MPa]) pela seguinte equação:

$$\sigma = \frac{P(d_{em} - e_{min})}{20e_{min}} \quad [XXIX]$$

Onde:

- P – Pressão interna [bar]
- d_{em} – diâmetro médio exterior do tubo [mm]
- e_{min} – espessura mínima do tubo [mm]

5.1.1. Tempo limite de extrapolação: factor k_e

A aplicação da equação de extrapolação permite determinar a pressão interna radial do tubo para qualquer valor de tempo (t), mas existe um valor limite para que o resultado seja aceite em termos de procedimento baseado na norma.

O tempo limite de extrapolação (t_e) pode ser determinado através do factor de extrapolação (k_e), função de ΔT ,

$$\Delta T = T_t - T \quad [XXX]$$

O cálculo do tempo de extrapolação, t_e (h), é baseado na seguinte equação:

$$t_e = k_e \times t_{\max} \quad [XXXI]$$

Onde:

- $T_{t,\max}$ – temperatura máxima de teste ($^{\circ}\text{C}$)
- T_t – temperatura à qual o factor de extrapolação é aplicado, $T_t \leq T_{t,\max}$ ($^{\circ}\text{C}$)
- T – temperatura para a qual é calculado o tempo limite de extrapolação, $T_t \leq T$ ($^{\circ}\text{C}$)
- t_{\max} – tempo máximo de teste (h)

Quando t_{\max} é igual a 8760h (1 ano), k_e representa o tempo máximo de extrapolação, t_e , em anos.

As figuras seguintes representam o tempo limite de extrapolação para o caso do ponto de inflexão ser ou não detectado.

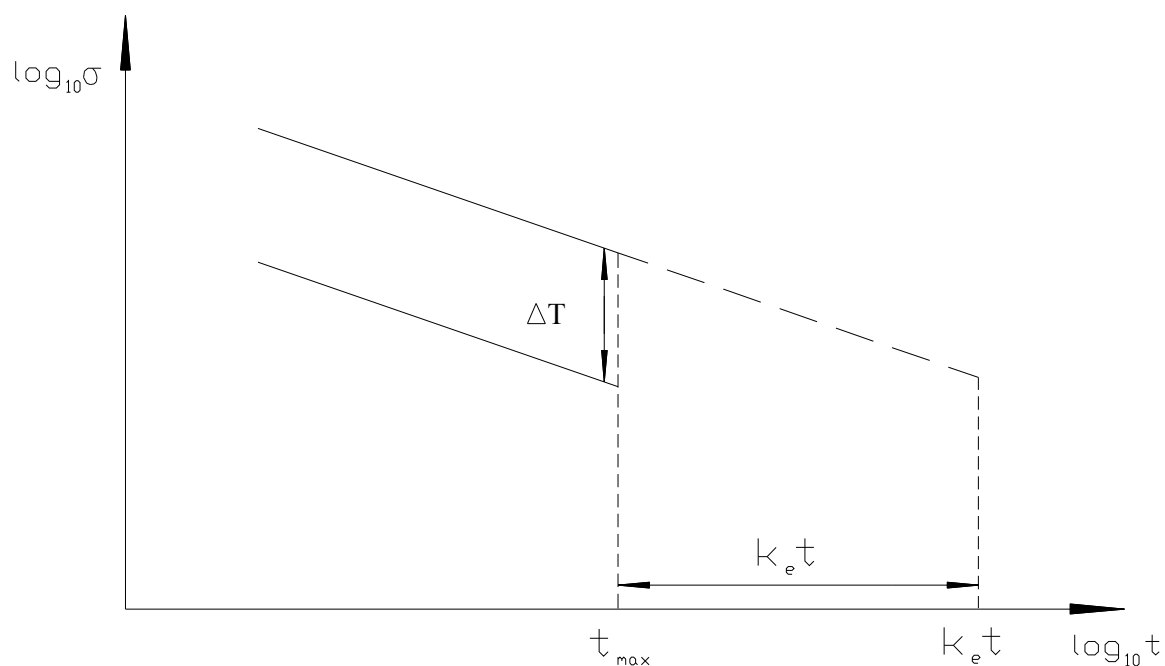


Figura 46 – Limite de extrapolação sem ponto de inflexão na maior temperatura testada, [26]

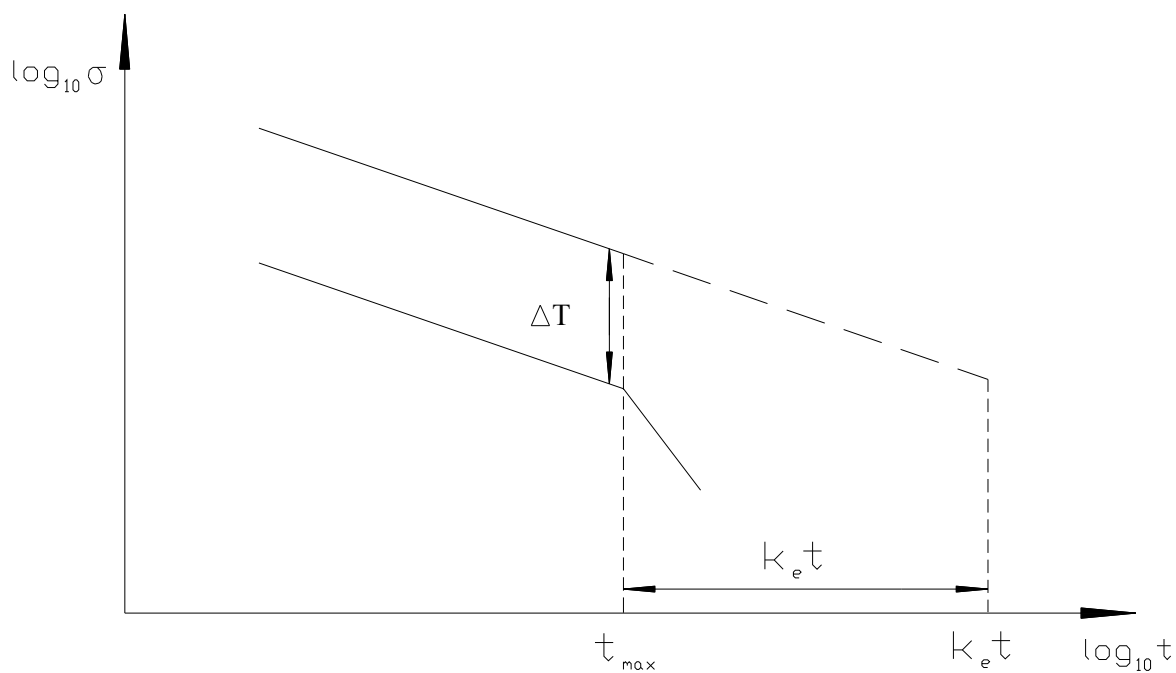


Figura 47 – Limite de extrapolação com ponto de inflexão só na maior temperatura testada, [26]

O valor de k_e em relação a ΔT é retirado de uma das seguintes tabelas, dependendo do material do tubo em ensaio – retiradas da norma em análise.

Tabela 15 – Relação entre ΔT e k_e para poliolefinas, [26]

ΔT	k_e
≥ 10	2,5
≥ 15	4
≥ 20	6
≥ 25	12
≥ 30	18
≥ 35	30
≥ 40	50
≥ 60	100

Tabela 16 – Relação entre ΔT e k_e para Cloreto de vinilo, [26]

ΔT	k_e
≥ 5	2,5
≥ 10	5
≥ 15	10
≥ 20	25
≥ 25	50
≥ 30	100

Para os polímeros que não se enquadram em nenhuma das anteriores tabelas, deverão ser utilizados os factores da *Tabela 15*.

Assim, se os ensaios forem executados a 55°C e a 90°C então $\Delta T \geq 35$ °K o que pela *Tabela 15* tem um valor de $K_e = 30$.

Para um ensaio executado durante meio ano, equivalente a 4382 horas, vem que o tempo máximo de extrapolação é, pela *equação [XXXI]*.

$$t_e = 30 \times 4382$$

$$\Rightarrow t_e = 121460 \text{ horas} \approx 15 \text{ anos}$$

Pelos cálculos apresentados anteriormente, ensaios a 55 °C e a 90 °C, durante um período de **meio ano**, permitem uma extrapolação até ao máximo de **quinze anos**.

5.1.2. Modelos de regressão

O modelo geral é o de 4 – parâmetros e é descrito de seguida:

$$\log_{10} t = c_1 + \frac{c_2}{T} + c_3 \times \log_{10} \sigma + c_4 \times \frac{(\log_{10} \sigma)}{T} + e \quad [\text{XXXII}]$$

Este modelo pode ser reduzido para um modelo de 3 – parâmetros se c_3 se considerar desprezável ($c_3=0$):

$$\log_{10} t = c_1 + \frac{c_2}{T} + c_4 \times \frac{(\log_{10} \sigma)}{T} + e \quad [\text{XXXIII}]$$

Ou para um modelo de 2 – parâmetros, se todos os dados se referirem à mesma temperatura:

$$\log_{10} t = c_1 + c_3 \times (\log_{10} \sigma) + e \quad [\text{XXXIV}]$$

Onde:

- t – tempo até à ruptura (h);
- T – temperatura ($^{\circ}K = ^{\circ}C + 273,16$);
- σ – pressão radial (MPa);
- c_i – parâmetros;
- e – erro com uma distribuição *Laplace-Gauss*, com média zero e constante variação. Os erros assumem-se independentes.

Os cálculos para o modelo de 4 – parâmetros são descritos de seguida. Os correspondentes cálculos para os restantes modelos podem ser obtidos removendo os respectivos termos.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1/T_1 & \log_{10} \sigma_1 & (\log_{10} \sigma_1)/T_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1/T_N & \log_{10} \sigma_N & (\log_{10} \sigma_N)/T_N \end{bmatrix} \quad [XXXV]$$

$$y = \begin{bmatrix} \log_{10} t_1 \\ \vdots \\ \log_{10} t_N \end{bmatrix} \quad [XXXVI]$$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad [XXXVII]$$

Em que N é o numero total de observações.

Para o cálculo dos parâmetros é aplicada a seguinte equação:

$$c = (X^T X)^{-1} X^T y \quad [XXXVIII]$$

E a variância residual estimada é dada por:

$$s^2 = (y - Xc)^T (y - Xc) / (N - q) \quad [XXXIX]$$

Onde q é o número de parâmetros do modelo.

Para calcular σ_{LPL} , correspondente ao tempo até à ruptura (t) e à temperatura (T) é aplicada a seguinte equação:

$$\log_{10} \sigma_{LPL} = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad [XL]$$

Onde:

- $\alpha = \left(c_3 + \frac{c_4}{T} \right)^2 - t_{St}^2 s^2 \left(K_{33} + 2 \frac{K_{43}}{T} + \frac{K_{44}}{T^2} \right)$
- $\beta = 2 \left(c_1 + \frac{c_2}{T} - \log_{10} t \right) \left(c_3 + \frac{c_4}{T} \right) - 2 t_{St}^2 s^2 \left(K_{31} + \frac{(K_{41} + K_{32})}{T} + \frac{(K_{42})}{T^2} \right)$
- $\gamma = \left(c_1 + \frac{c_2}{T} - \log_{10} t \right)^2 - t_{St}^2 s^2 \left(K_{11} + 2 \frac{K_{21}}{T} + \frac{K_{22}}{T^2} + 1 \right)$
- K_{ij} = elemento de índice i, j da matrix $(X^T X)^{-1}$

Para o modelo de 3 – parâmetros vem:

- $\alpha = \left(\frac{c_4}{T} \right)^2 - t_{St}^2 s^2 \left(\frac{K_{44}}{T^2} \right)$
- $\beta = 2 \left(c_1 + \frac{c_2}{T} - \log_{10} t \right) \left(\frac{c_4}{T} \right) - 2 t_{St}^2 s^2 \left(\frac{(K_{41})}{T} + \frac{(K_{42})}{T^2} \right)$
- $\gamma = \left(c_1 + \frac{c_2}{T} - \log_{10} t \right)^2 - t_{St}^2 s^2 \left(K_{11} + 2 \frac{K_{21}}{T} + \frac{K_{22}}{T^2} + 1 \right)$
- t_{St}^2 = com N - 3 graus de liberdade

Para o modelo de 2 – parâmetros vem:

- $\alpha = (c_3)^2 - t_{St}^2 s^2 (K_{33})$
- $\beta = 2(c_1 - \log_{10} t)(c_3) - 2 t_{St}^2 s^2 (K_{31})$
- $\gamma = (c_1 - \log_{10} t)^2 - t_{St}^2 s^2 (K_{11} + 1)$
- t_{St}^2 = com N - 2 graus de liberdade

5.1.3. Determinação do ponto de inflexão

Idealmente, o tipo de ruptura frágil (ocorre sem haver deformação plástica significativa) ou dúctil (precedida por uma deformação plástica.) é determinado pela análise visual da amostra. Em diversos casos, uma correcta avaliação do tipo de ruptura não é possível.

Neste método o tipo de ruptura depende do valor da pressão radial, a ruptura frágil está situada abaixo do valor do ponto de inflexão enquanto que acima deste valor existe a ruptura dúctil. Para os casos em que o tipo de ruptura é evidente, estes devem ser tratados em concordância.

Através da seguinte equação é possível determinar o valor óptimo para σ_k :

$$\log_{10} t = c_1 + c_3 \log_{10} \sigma + c_{3i} (\log_{10} \sigma - \log_{10} \sigma_k) + e \quad [\text{XLI}]$$

Onde:

- σ_k – Pressão de ruptura correspondente ao ponto de inflexão (*bar*);
- c_{3i} – Parâmetro que afecta de forma qualitativa o tipo de ruptura: $i=1$ para ruptura dúctil e $i=2$ para ruptura frágil;

Uma forma prática de obter este valor é analisar a gama de valores de pressão e calcular a variância residual estimada para cada ponto de pressão e tempo. O valor mínimo obtido é denotado por s_k^2 e indica o ponto onde se dá a ruptura e consequentemente o valor óptimo de σ_k .

É necessário contudo validar a existência do ponto de inflexão dentro do conjunto de pontos obtidos experimentalmente. *Fisher Statistic* (F) é um método que compara s_k^2 (variância residual correspondente ao modelo sem ponto de inflexão) com s^2 (variância residual estimada obtida através do modelo sem ponto de inflexão).

$$F_{N-2, N-4} = \frac{s^2}{s_k^2} \quad [\text{XLII}]$$

Apresenta uma distribuição de $N-2$ graus de liberdade para o numerador e $N-4$ graus de liberdade para o denominador, em que N é o número de medidas.

Assume-se a ausência de ponto de inflexão até um nível de probabilidade de 5%, isto é, se a probabilidade associada ao valor de F é superior a 0,05. Caso contrário a presença de um ponto de inflexão é aceite. A probabilidade associada ao valor de F pode ser encontrada em tabelas.

5.1.4. Dados a recolher

Um pouco diferente mas que se encontra de acordo com a norma e segundo o laboratório *Becetel – Belgian Research Centre for Pipes and Fittings*, através de *Mr. Joris Vienne*, não sai do âmbito da norma, outra forma de obter os dados é colocar todos os provetes imersos em cada uma das temperaturas de ensaio, sujeitos a uma pressão que corresponde à pressão de utilização em ambiente real, afectada de um coeficiente de segurança de 2,5. Posteriormente, no final de tempos definidos retirar um conjunto de provetes e provocar o rebentamento dos mesmos, registando a pressão de rebentamento.

A pressão de rebentamento será tanto mais pequena quanto maior for o tempo a que os provetes estão sujeitos às condições de temperatura e pressão do ensaio.

Este é o método proposto para verificação experimental, tendo em conta que o equipamento necessário é consideravelmente de mais baixo custo do que seria necessário para o modo descrito anteriormente, mantendo o rigor da análise do comportamento mecânico.

Os dados obtidos deverão ser colocados num documento do Microsoft Excel[®] em conjuntos de três colunas e um número de linhas igual ao número de pontos retirados do ensaio, separados por uma coluna.

Seguindo a norma *ISO/DIS 9080:1997 [26]*, para cada temperatura deverão ser obtidas pelo menos 30 observações, com espaçamentos mais ou menos regulares para pelo menos 5 níveis diferentes de pressão interna. Por razões estatísticas é importante que seja retirado mais do que uma observação para cada nível de pressão interna (segundo a norma *ISO 1167-1 [27]*, no seu ponto 6.2, deverão ser preparadas no mínimo três provetes para cada nível de pressão).

Em cada conjunto, na primeira coluna deverá ser colocada a temperatura de ensaio, em $[^{\circ}\text{C}]$. A segunda deverá contemplar a tensão à qual ocorreu a ruptura, em $[\text{MPa}]$, retirada do valor da pressão de rebentamento pela equação [XXIX]. Na terceira coluna deverão constar o intervalo de tempo decorrido entre o início do ensaio e o momento da ruptura, para cada valor de ruptura respectivo, em $[h]$.

A tabela seguinte mostra os pontos retirados de um teste com três níveis de temperatura e vários níveis de pressão, de uma poliolefina.

Tabela 17 – Exemplo de tabela com pontos a recolher do ensaio de rebentamento

Temperatura 20°C			Temperatura 40°C			Temperatura 60°C		
T [°K]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	T [°K]	Tensão [MPa]	Tempo [h]	T [°K]	Tensão [MPa]	Tempo [h]
293,16	16,00	11	313,16	11,10	10	333,16	9,60	10
293,16	15,00	58	313,16	11,20	11	333,16	9,50	13
293,16	15,00	44	313,16	11,50	20	333,16	9,50	32
293,16	14,90	21	313,16	11,50	32	333,16	9,50	34,0
293,16	14,50	25	313,16	11,50	35	333,16	9,50	114,0
293,16	14,50	24	313,16	10,80	54	333,16	9,50	195,0
293,16	14,30	46	313,16	11,50	83	333,16	9,20	151,0
293,16	14,10	111	313,16	11,20	240	333,16	9,00	242,0
293,16	14,00	201	313,16	11,20	282	333,16	9,00	476,0
293,16	14,00	260	313,16	11,00	1912	333,16	9,00	205,0
293,16	14,00	201	313,16	11,00	1856	333,16	9,00	153,0
293,16	13,90	13	313,16	11,00	1688	333,16	9,00	288,0
293,16	13,70	392	313,16	11,00	1114	333,16	8,90	191,0
293,16	13,70	464	313,16	10,50	1145	333,16	8,50	149,0
293,16	13,60	680	313,16	10,00	5448	333,16	8,50	344,0
293,16	13,50	411	313,16	10,00	3488	333,16	8,50	423,0
293,16	13,50	412	313,16	10,00	1488	333,16	8,50	686,0
293,16	13,50	3368	313,16	10,00	1698	333,16	8,50	585,0
293,16	13,50	865	313,16	10,00	2076	333,16	8,50	719,0
293,16	13,50	946	313,16	9,50	1238	333,16	7,50	590,0
293,16	13,40	122	313,16	9,50	2165	333,16	7,50	519,0
293,16	13,40	5137	313,16	9,50	7823	333,16	7,50	351,0
293,16	13,30	1112	313,16	9,00	4128	333,16	7,00	734,0
293,16	13,30	2108	313,16	9,00	4448	333,16	7,00	901,0
293,16	13,20	1651	313,16	8,50	7357	333,16	7,00	1071,0
293,16	13,20	1760	313,16	8,50	5448	333,16	7,00	1513,0

293,16	12,80	837	313,16	8,00	7233	333,16	6,50	1042,0
			313,16	8,00	5959	333,16	6,00	4090,0
			313,16	8,00	12081	333,16	6,00	839,0
			313,16	7,50	12888	333,16	6,00	800,0
			313,16	7,50	10578	333,16	5,50	339,0
			313,16	6,50	12912	333,16	5,50	2146,0
			313,16	6,00	11606	333,16	5,50	2856,0
						333,16	5,00	1997,0
						333,16	5,00	1647
						333,16	4,00	6345
						333,16	3,50	15911
						333,16	3,40	6841
						333,16	3,40	8232
						333,16	2,90	15090

5.2. APLICAÇÃO MATEMÁTICA PARA PREDIÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Desenvolvimento de uma aplicação em MatLab® para avaliar o comportamento mecânico dos tubos quando sujeitos a uma determinada pressão e temperatura.

Esta aplicação implementa o processo descrito na norma *ISO/DIS 9080:1997* [26], vários níveis de temperatura e um número finito de observações. Sendo que, para que se possam aplicar as equações da referida norma é necessário executar o ensaio a pelo menos duas temperaturas diferentes – visto tratar-se de uma extrapolação.

A necessidade de desenvolver uma ferramenta informática para tratamento dos dados recolhidos verifica-se imediatamente após se compreenderem as equações descritas na referida norma, que baseia todo o procedimento prático de análise mecânica.

O tratamento de dados é tanto mais complexo quanto maior for o número de pontos retirados dos testes e o número de temperaturas a que foi sujeito o ensaio. Como refere a norma, o ensaio com temperaturas elevadas permite obter tempos de extrapolação maiores, sendo portanto importante que pelo menos uma das temperaturas seja alta.

5.2.1. Procedimento de Cálculo

Partindo de uma tabela como a *Tabela 17*, é necessário determinar a existência de um ponto de inflexão, que localiza a mudança do tipo de ruptura (Frágil para Dúctil), como foi exposto anteriormente.

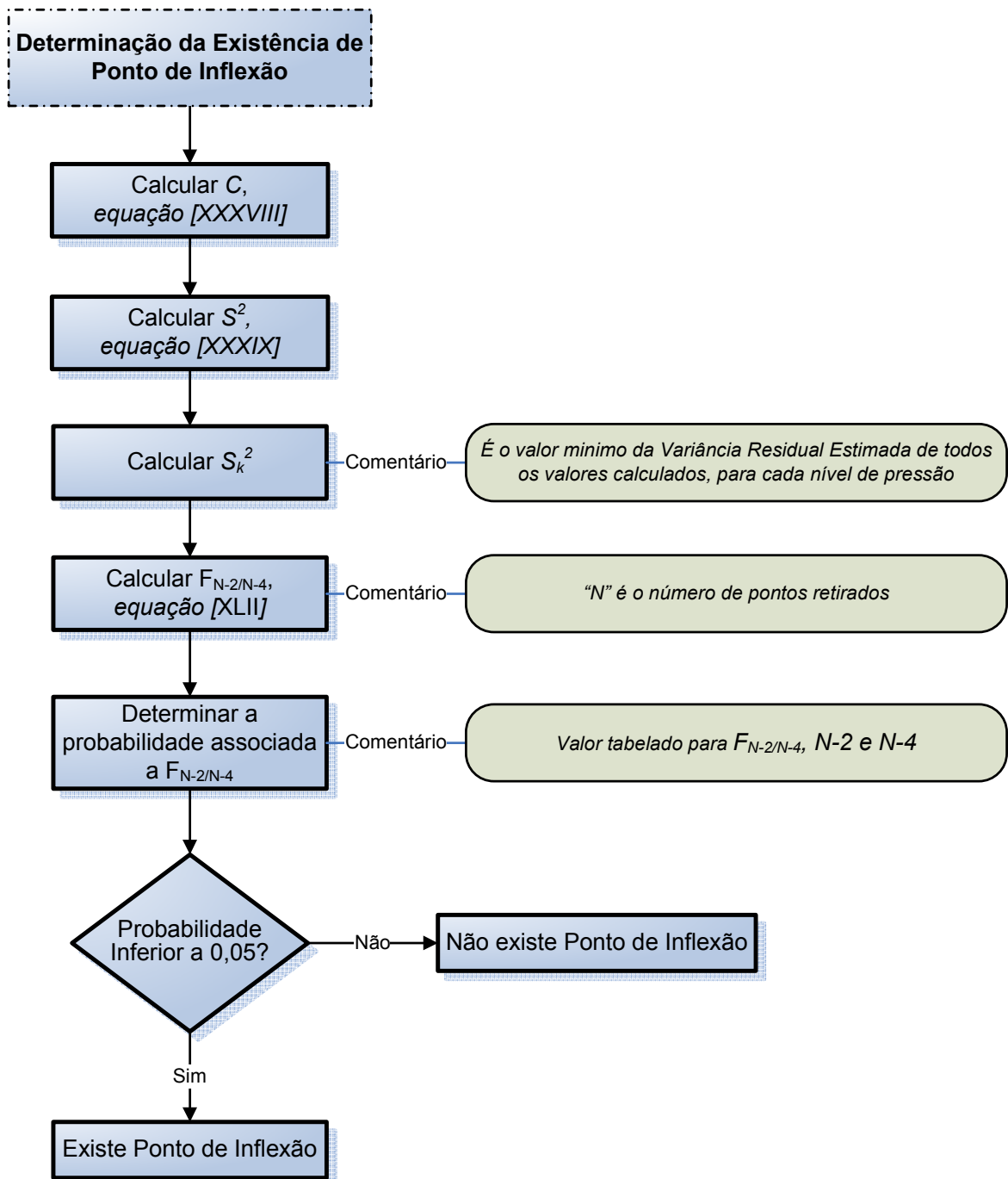


Figura 48 – Fluxograma para o cálculo do Ponto de Inflexão

Posteriormente é possível então aplicar o modelo de regressão adoptado, que segundo a norma que baseia esta análise, o modelo de regressão de 3 parâmetros apresenta erros consideravelmente baixos.

Considerando o exposto no parágrafo anterior, o modelo adoptado para o desenvolvimento do software foi o de 3 parâmetros (C_1 , C_2 e C_4).

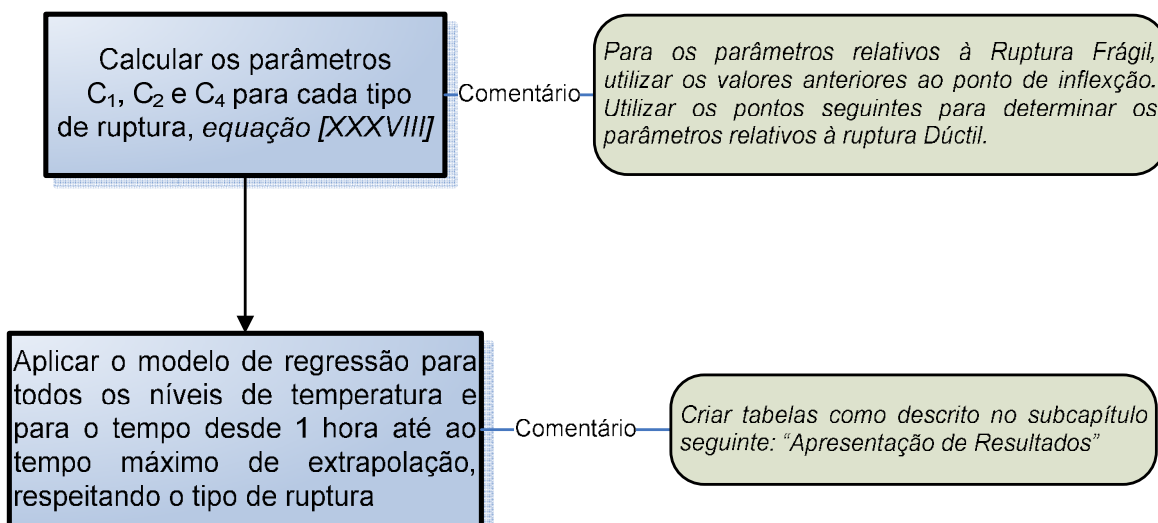


Figura 49 – Fluxograma do cálculo da tensão de ruptura

5.2.2. Apresentação de Resultados

Os resultados serão apresentados para cada nível de temperatura ensaiada e para vários valores de tempo no intervalo de 1 hora até ao tempo limite de extrapolação.

A apresentação dos resultados poderá ser feita através de tabelas, como se mostra a seguir, para o exemplo dos valores apresentados para a poliolefina, no sub capítulo 5.1.4 *Dados a Recolher*.

Tabela 18 – Posição do Ponto de Inflexão

Temperatura [°C]	Tensão [MPa]	Tempo [h]
20	11,92	26664
40	10,18	2515
60	8,70	315

Tabela 19 – Tensão Calculada para a Ruptura Frágil (A)

Time [h]	1	10	100	1000	10000	100000
Temperatura [°C]	Predição [MPa]					
20	16,678	15,458	14,328	13,281	12,310	B
40	13,416	12,372	11,408	10,519	B	B
60	10,793	9,901	9,082	B	B	B

Tabela 20 – Tensão Calculada para a Ruptura Dúctil (B)

Time [h]	1	10	100	1000	10000	100000
Temperatura [°C]	Predição [MPa]					
20	A	A	A	A	A	8,661
40	A	A	A	A	7,132	3,937
60	A	A	A	6,336	3,368	1,790

5.3. MODELO EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DAS PRESSÕES DE REBENTAMENTO

Baseado na referida e apresentada norma ISO/DIS 9080:1997 foi projectada e proposta uma bancada de ensaio para obtenção de valores de *Pressão de Rebentamento* do tubo, em condições específicas, ao longo do tempo.

A análise mecânica dos tubos será então feita através do procedimento de cálculo apresentado, utilizando os dados recolhidos experimentalmente para dois níveis de temperaturas (60 e 90 °C). Ao contrário da análise térmica, os ensaios não têm como função validar o procedimento de cálculo, uma vez que este está já validado pela norma anteriormente exposta e pelo exemplo que a própria norma apresenta.

5.3.1. Condições de ensaio

É de extrema importância definir os procedimentos a utilizar, os dados a adquirir e a forma de os adquirir.

O meio no interior do tubo deverá ser água, sendo que o meio exterior poderá ser ar ou água. A pressão no interior deverá ser mantida constante, com um intervalo de tolerância de -1% a +2% durante a realização do teste. O ambiente exterior deverá ser mantido a uma temperatura constante, com um intervalo de tolerância de $\pm 1\%$ °C, durante a realização do teste. Estes valores e estas características deverão constar do relatório de ensaio, que será detalhado posteriormente. A pressão a utilizar no interior do permutador de calor deverá ser a estimada para o funcionamento em ambiente real, afectada de um factor de 2,5.

A determinação da resistência interna à pressão deverá ser realizada em tubos rectilíneos.

As temperaturas de ensaio devem distar pelo menos 10 °C.

A fim de obter uma boa estimativa do valor de σ_{LPL} , a gama de temperaturas seleccionada, deve incluir a temperatura de serviço ou a gama de temperaturas de serviço.

A circulação de um determinado caudal no interior aproximaria a análise mecânica do comportamento em ambiente real, mas estaria a acrescentar factores que não são considerados nos cálculos propostos pela norma, como por exemplo os esforços de atrito e o desgaste das paredes do tubo por abrasão. Assim, deverá ser utilizada água estática no interior do sistema, com especial atenção para o facto de o sistema estar livre de bolhas de ar misturadas com a água.

5.3.2. Bancada de Ensaio

A bancada de ensaios foi desenvolvida de forma a se obterem os dados de acordo com o descrito no capítulo *Dados a Recolher* e segundo as condições descritas no capítulo *Condições de Ensaio*.

A bancada de ensaios passou por um processo de evolução, à medida que se iam aprofundando os conhecimentos relativos às normas a aplicar, as necessidades e exigências mecânicas do sistema e os custos que se iam avaliando.

A figura seguinte apresenta os principais componentes projectados para a bancada de ensaios.

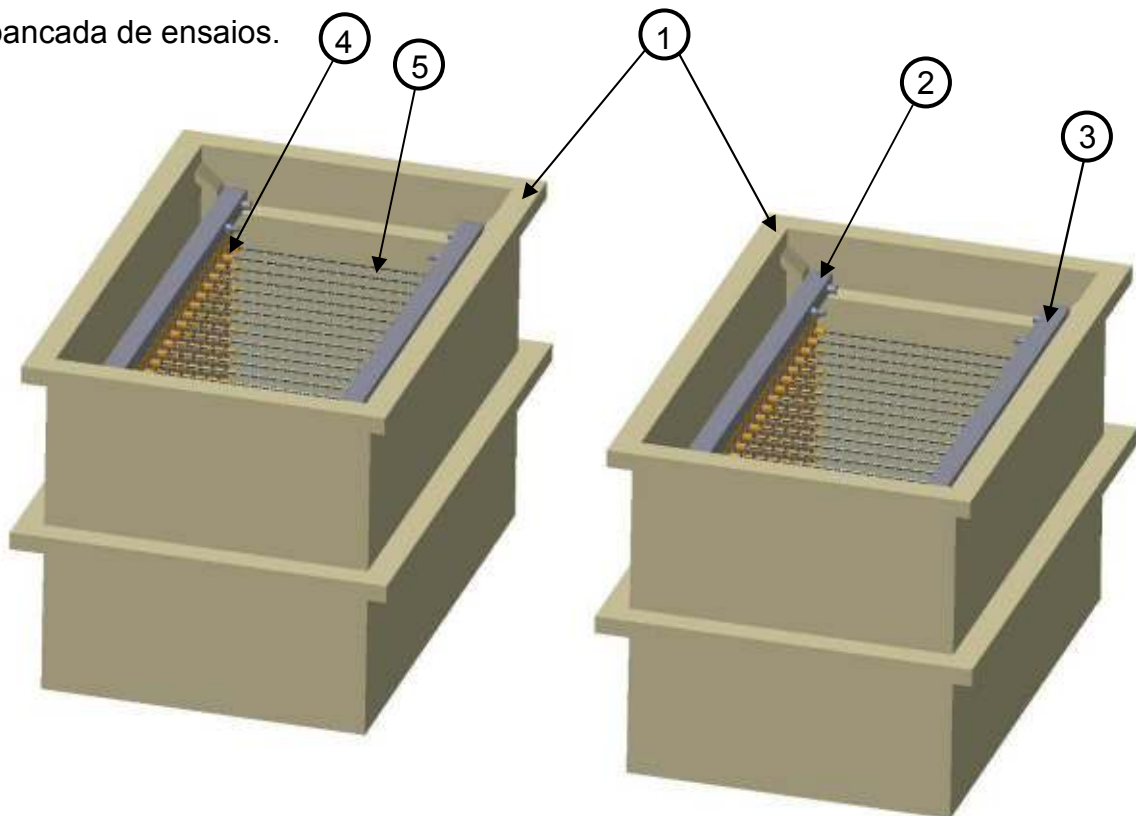


Figura 50 – Bancada de ensaios, legendada

Legenda:

- 1 – Dois tanques (para duas temperaturas), com respectivas tampas;
- 2 – Colector de entrada;
- 3 – Colector de saída;
- 4 – Fittings;
- 5 – Tubos poliméricos – provetes.

Colectores

Os colectores são provavelmente o componente mais importante de todo o sistema. Obrigaram a um conhecimento profundo das exigências mecânicas do sistema a longo prazo e a um desenvolvimento bastante técnico de forma a responder à complexidade de uma ligação expedita de tubos poliméricos a tubos metálicos, com segurança para pressões elevadas.

Opção 1

Esta solução é à partida a mais cara, mas também a que oferece mais garantias a nível da resistência à oxidação nas condições anteriormente referidas (água a 95 °C).

A construção dos colectores em inox implica a utilização de *fittings* em inox, para que se possam soldar directamente aos tubos. A utilização de ligações roscadas permitia utilizar *fittings* em aço, mas obrigaria a aumentar o diâmetro e a espessura dos tubos, o que levaria a um aumento incontrolável do preço.

Tabela 21 – Colectores - Opção 1

Pos.	Designação	Quant.	Vantagens	Preço [€]	Selec.
1	Colector Inox Tubular	4 [-]	Suporta as condições exigidas para o ensaio, sem risco de oxidação	???	✓
2	Fittings Inox	972 [-]	Fixação soldada ao colector	2400	✓
		1 [-]	Ligação à bomba de ensaio	2.5	✓
3	Tampões Inox	972 [-]	Maior resistência à oxidação	1032	✓
Total				3432+	

Opção 2

Esta solução diferencia-se pelo material de construção do colector, que possibilita a utilização de *fittings* em aço (de preço inferior). A resistência à oxidação é bastante inferior à anterior opção. A fim de tornar esta opção válida será aplicado o tratamento de galvanização nos colectores.

São apresentadas ligações roscadas dos acessórios – posição 5 – ao tubo – posição 2 – o mesmo acontecendo aos acessórios – posição 3 – ao tubo – posição 1. Este tipo de ligação tem a vantagem de só necessitar de tamponar dois pontos ao invés dos 24, podendo retirar os tubos de distribuição correspondentes ao conjunto de provetes que está a ser retirado de ensaio, evitando que permaneçam em condições propícias à oxidação. Possibilita a reutilização de todos os acessórios utilizados.

Tabela 22 – Colectores – Opção 2

Pos.	Designação	Quant.	Vantagens	Preço [€]	Selec.
1	Tubo Quadrado.Aco 40x50 (x6)	6 [m]	Custo inferior ao tubo inox	50	✓
2	Tubo Duo.Aco 38x4.0	56 [m]	Custo inferior ao tubo inox	526	✓
3	Acessório Duouniao.T/R – 38Sx1/8	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes – ligação roscada deste fitting ao tubo quadrado	740	✓
4	Acessório Duotampao/ Bicone – 38S	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes	348	✓
5	Acessório Duouniao.T/R – 6Lx1/8	972 [-]	Ligação soldada ao <i>Tubo Duo.Aco 22x1.5</i>	631.8	✓
6	Montagem	[-]	Furar e roscar os tubos para fixação de todos os acessórios	300	✓
7	Galvanização do colector tubular em aço	4 [-]	Protecção à oxidação	???	✓
Total				2596+	

Opção 3

Esta solução usufrui das mesmas vantagens da proposta anterior em termos do material em que são concebidos.

O que distingue esta proposta da anterior é o facto de os acessórios – *posição 3* – serem soldados ao tubo – *posição 2*. O mesmo acontecendo com os acessórios – *posição 4* – que são soldados ao tubo – *posição 1*. A opção pelas ligações soldadas permite utilizar tubos de diâmetro e espessura de parede inferior, tornando-se economicamente mais vantajoso. Para além da questão económica, tem também a vantagem de ser mais leve o que facilita em termos de apoio do sistema no tanque.

Tabela 23 – Colectores – Opção 3

Pos.	Designação	Quant.	Vantagens	Preço [€]	Selec.
1	Tubo Quadrado 40x50 (x6)	6 [m]	Custo inferior ao tubo inox	50	✓
2	Tubo Duo.Aco 22x1.5	56 [m]	Custo inferior ao tubo inox	168	✓
3	Acessório Duouniao.T/R – 22Lx3/4	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes – ligação soldada deste fitting ao tubo quadrado	198.4	✓
4	Acessório Duotampao/ Bicone – 22L	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes	96	✓
5	Acessório Duouniao.T/R – 6Lx1/8	972 [-]	Ligação soldada ao <i>Tubo Duo.Aco 22x1.5</i>	631.8	✓
6	Montagem	[-]	Furar e soldar todos os acessórios aos tubos	330	✓
7	Galvanização do colector tubular em aço	4 [-]	Protecção à oxidação	???	✓
Total				1444+	

5.3.3. Caderno de Encargos

Notas Técnicas

O projecto apresentado está englobado no âmbito da análise do comportamento mecânico de tubos poliméricos, quando sujeitos a condições de pressão, temperatura e meio bem definidos.

O objectivo geral é a colocação de 2 conjuntos de 240 segmentos de tubos poliméricos, imersos em água e com água no seu interior (*water-in-water*).

A água exterior deverá estar à pressão ambiente com um conjunto a uma temperatura de 95 °C e outro a 60 °C para outro conjunto.

A água no interior dos tubos deverá estar a uma pressão de 15 bar.

Cada conjunto será composto por 20 colunas, cada uma com 12 tubos. Cada coluna será composta por 3 espécimes de 4 tipos diferentes de polímeros.

Os tubos a ensaiar terão todos as mesmas características geométricas:

- $\varnothing_{in} = 6 \text{ mm}$
- $\varnothing_{out} = 5.2 \text{ mm}$
- $L = 50 \text{ mm}$

Uma vez que os tubos terão de estar sujeitos à mesma pressão, deverão ser construídos colectores com uma toma única de pressão, e uma única purga do sistema.

Será necessário retirar os tubos de forma parcelar ao longo do tempo. Sempre coluna a coluna, sendo por isso útil uma construção seccionada por conjunto de 12 tubos.

Desenhos

Todos os componentes foram modelados a 3D, tendo cada um o respectivo desenho 2D cotado para posterior produção. A modelação está à escala de 1:1, sendo aqui apresentada na escala mais conveniente para a visualização.

Os componentes normalizados foram modelados à escala com o nível de detalhe suficiente para apresentação do conjunto.

Tanques

Serão necessários dois tanques de acordo com a modelação seguinte e com dimensionamento em anexo.

O material será Polipropileno (*PP*), com tubos paralelepípedicos de aço no interior dos reforços – na aba e a metade da altura.

A estrutura no interior dos tanques (como se pode ver nas figuras seguintes) será para apoio do sistema – Colectores / Tubos poliméricos.

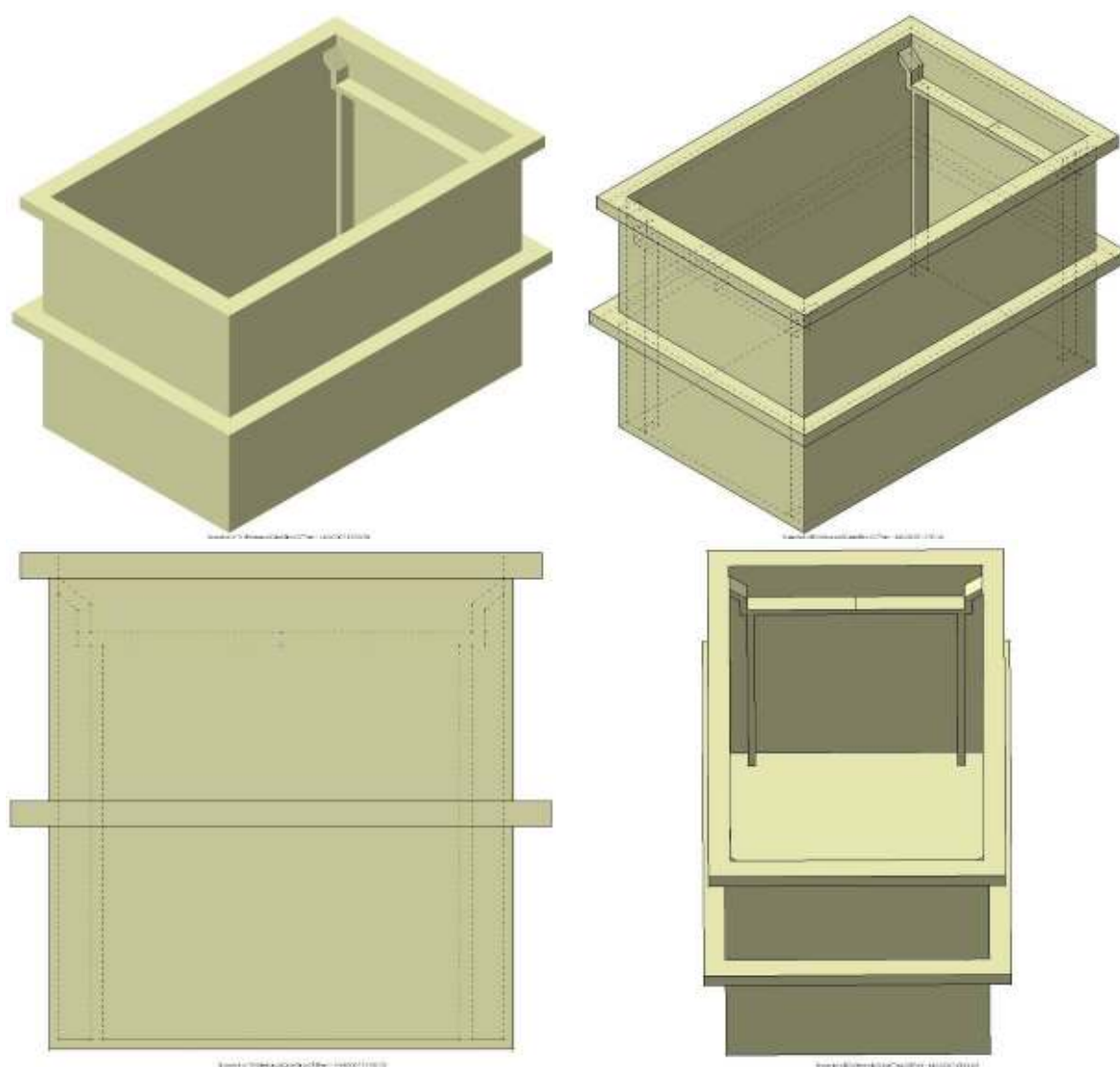
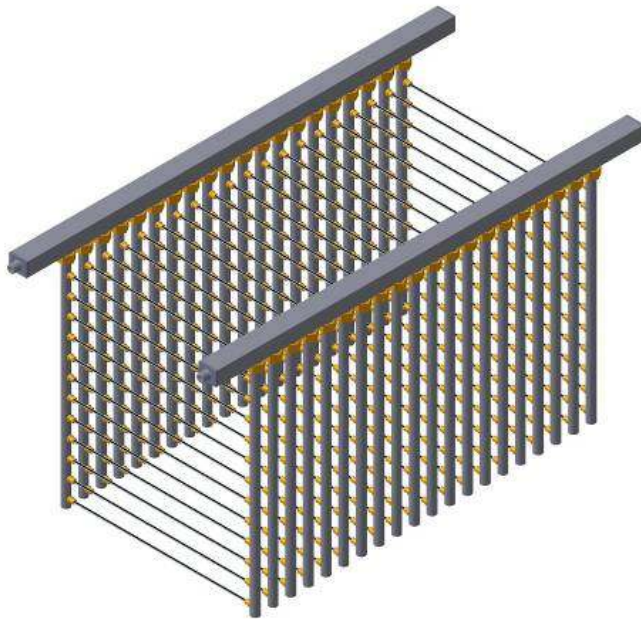


Figura 51 – Tina em Polipropileno

Colectores

As três opções apresentadas anteriormente respondem aos requisitos impostos para o ensaio. Foi necessário no entanto encontrar uma opção equilibrada entre custos e capacidade de resposta a esses mesmos requisitos.

Assim, a opção seleccionada para prosseguir com a proposta para a componente prática respeitante à análise mecânica dos tubos poliméricos, foi a terceira.



Modelação 3D final para o sistema de montagem dos provetes em condições que possibilitam a sua colocação sob uma pressão de 15 bar.

Figura 52 – Esquema final dos colectores

Fittings

Serão utilizados dois tipos de *fittings* diferentes. Um tipo, para fixação dos tubos circulares de aço ao tubo de aço de distribuição (*manifold*). O outro é para fixação dos tubos poliméricos ao conjunto colector.



Figura 53 – Fitting fixação dos tubos poliméricos



Figura 54 – Fitting fixação dos tubos de aço

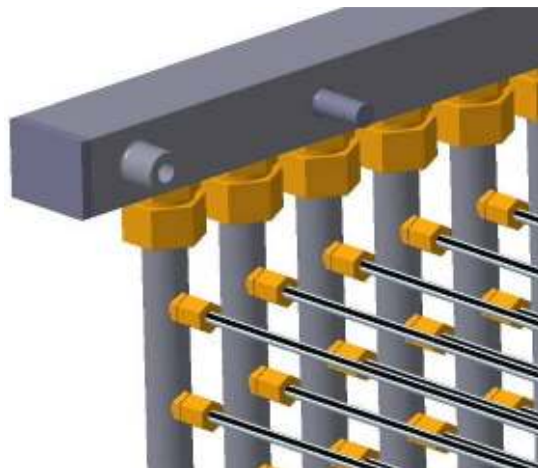


Figura 55 – Aplicação dos dois tipos de Fittings

Resistências

Dado que uma condição base do projecto é manter um sistema de tubos poliméricos imersos em água a 95 e 60 °C, é necessário um meio de aquecer a água contida nas “*Tinas*”.

A água será aquecida através de resistências eléctricas imersas permanentemente. A energia necessária para aquecer cada um dos sistemas é dada por:

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

[XLIII]

Podendo ser determinada, uma vez conhecido o volume de água a aquecer (m), a capacidade calorífica da água (cp) e a variação de temperatura, desde a temperatura ambiente até à temperatura determinada (ΔT).

- Volume de água a aquecer: $\approx 600 [l] \Rightarrow \approx 600 [kg]$
- Capacidade Calorífica da Água: $cp = 4.181 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

O factor Tempo de Aquecimento acaba por não ser um factor determinante na selecção da potência das resistências, uma vez que só será necessário executar esta tarefa uma vez. Após o aquecimento dos sistemas, as resistências terão como função repor a energia cedida ao exterior. Estas perdas são minimizadas pela construção adequada do equipamento – tinas poliméricas (baixa transferência de calor) e revestidas com um isolante térmico (lã de rocha).

Sistema de 95 °C

- Variação de temperatura: 80 °C

$$P = \frac{600 [kg] \times 4.181 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \times 80 [K]}{3600}$$

- Potência: $P = 55.7 [kWh]$
- As perdas de calor têm de ser inferiores a $55.7 [kWh]$

Utilizando 3 resistências em “*M*” de 2 kW cada, então:

$$t = \frac{55,7[kWh]}{3 \times 2[kW]}$$

- Tempo de Aquecimento: $t = 9.3h$

Sistema de 60 °C

- Variação de temperatura: 45 °C

$$P = \frac{600[kg] \times 4.181 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \times 45[K]}{3600}$$

- Potência: $P = 31.4[kWh]$
- As perdas de calor têm de ser inferiores a $31.4[kWh]$

Utilizando 3 resistências em “M” de 2 kW cada, então:

$$t = \frac{31,4[kWh]}{3 \times 2[kW]}$$

- Tempo de Aquecimento: $t = 5.2h$

Controlo

O aquecimento da água é conseguido através de resistências eléctricas, referidas no ponto anterior, e controlado por um sistema que monitoriza a temperatura da água e actua as resistências em conformidade.

Para além das funções referidas no parágrafo anterior, o sistema de controlo estará montado num quadro eléctrico e contará com dispositivos de protecção de potência, ligação geral e sistemas de activação de tensão e corrente.

O sistema de controlo será composto por:

Tabela 24 – Controlo de temperatura

Pos.	Designação	Quant.	Características	Preço [€] c\ IVA
1	Quadro	1 [-]	400x300x200	76
2	Controlador de temperatura	2 [-]	Com sonda	92
3	Disjuntor	2 [-]	4x10A	110
4	Contactor	2 [-]	5kW, 230V	70
5	Interruptor Geral	1 [-]	20A	35
6	Dijuntor DPN	4 [-]	2A	22
7	Int. Diferencial	1 [-]	4x25 / 0.3 ^a	52
8	Comutador	2 [-]	2P Fixas	42
9	Acessórios Vários	[-]	Componentes de ligação e fixação	51
10	Mão-de-obra	5 [-]	Montagem técnica	50
Total				600

Montagem:

Colectores / Fittings

A ligação dos tubos poliméricos é conseguida através de acessórios de ligação denominados por *Fittings Bi-cone*. Um dos componentes é soldado ao tubo circular de aço, sendo o outro roscado nesse, com um componente cónico no interior, causando a ligação do tubo polimérico por aperto – proporcional ao aperto do componente móvel sobre o soldado. Através de um procedimento semelhante os tubos circulares de aço são ligados ao componente fixo soldado ao *manifold*.

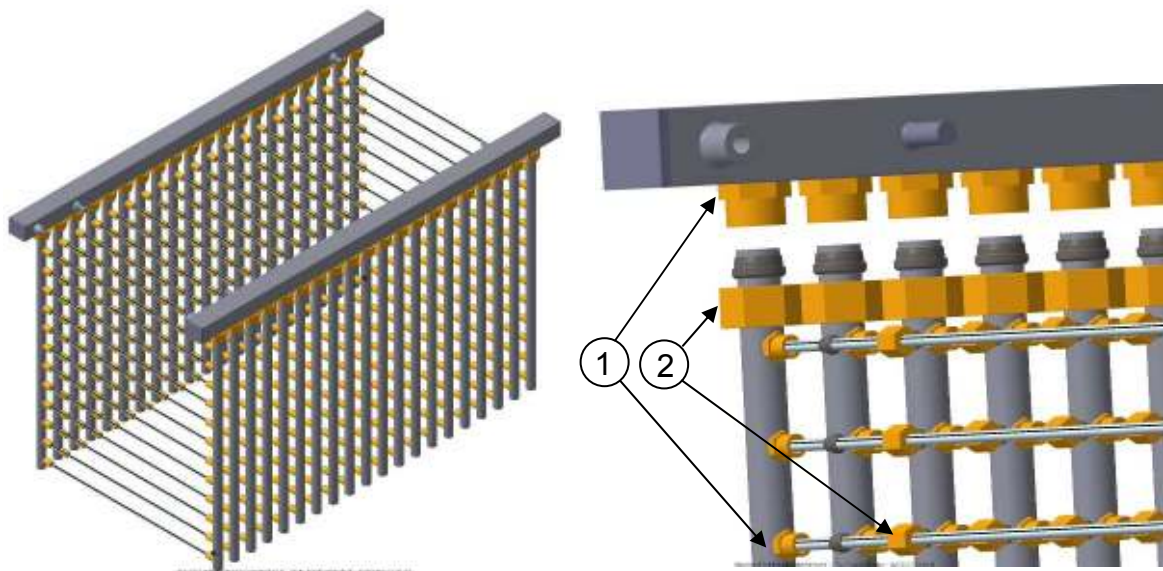


Figura 56 – Montagem: Colectores Fittings

Legenda:

- 1 – Ligações soldadas
- 2 – Ligações roscadas

Tanques / Colectores

A colocação dos colectores nos tanques é executada por encaixe numa configuração específica no interior do tanque para suportar a estrutura que compõe o sistema de colectores.

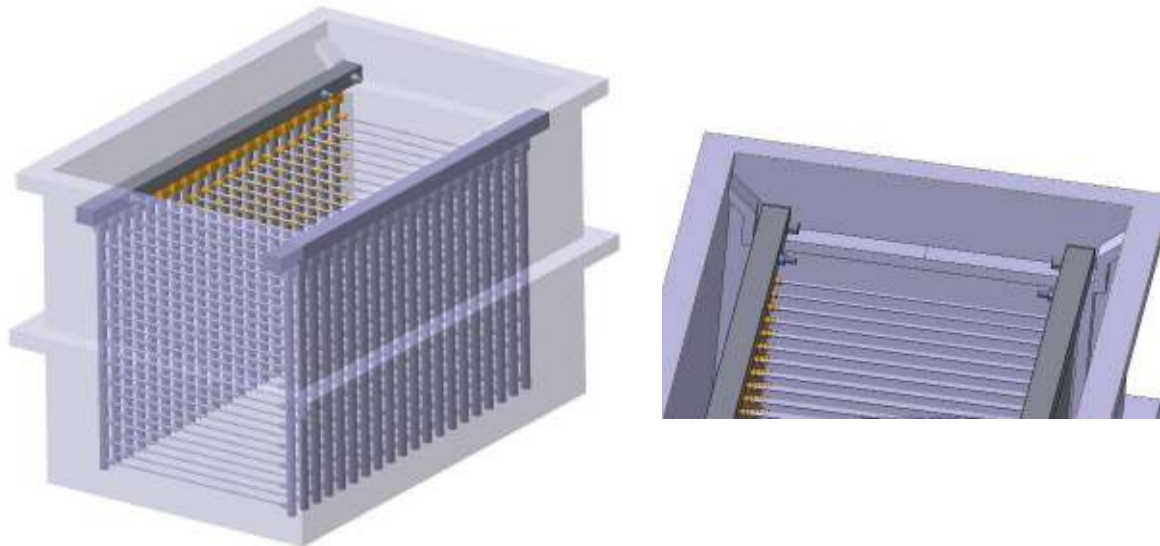


Figura 57 – Bancada de ensaios – pormenor

Montagens Restantes

As montagens restantes referem-se a ligações de acessórios e componentes normalizados que não se revestem de grandes questões técnicas e por isso não são detalhadas com exaustão.

As resistências propostas anteriormente deverão ser fixadas nas paredes laterais dos tanques, igualmente espaçadas entre si.

O Controlo será colocado no exterior da parede de um dos tanques com as respectivas ligações às resistências e às sondas nelas acopladas, ligado também à tensão de 220 V.

Métodos Construtivos

Os diversos componentes tiveram de passar por diferentes caminhos de preparação e montagem. São utilizadas ligações soldadas de componentes de aço e componentes poliméricos, ligações roscadas, entre os componentes de aço, ligações aparafusadas e ligações *bi-cone*.

Cada processo de ligação obedeceu a um critério de selecção cujos principais factores foram a eficácia da ligação e o custo. Custo não só relativo à própria ligação, como também de toda a envolvente. Algumas soluções foram excluídas, pois exigiam a montagem de alguns componentes dispendiosos.

Exemplo do que foi anteriormente referido é o caso da colocação dos *fittings* de fixação dos tubos poliméricos em ligação roscada ao tubo de aço. Esta solução obrigava a que os tubos tivessem um diâmetro e uma espessura bastante superior à utilizada. Outro caso seria a construção dos colectores com tubos em aço inox, o que implicaria a utilização de *fittings* do mesmo material, que são consideravelmente mais caros. No entanto a utilização de tubos em aço de construção implica um revestimento posterior para prevenir a corrosão em ambiente aquoso.

Em todo o desenvolvimento é necessário avaliar a relação custo/eficácia de cada componente e de todos de uma forma global.

Prazo

Prazo de execução de todo o sistema: 60 / 90 dias após a confirmação de execução.

Regras de Qualidade

A conformidade dos componentes será assumida pelos fornecedores dos mesmos, que serão os responsáveis por qualquer defeito de fabrico.

A conformidade da montagem de acordo com o projecto será assegurada pela supervisão de um Engenheiro Mecânico e pela execução de técnicos especializados.

Designação; Quantidades; Especificações e Custos

Tabela 25 – Custos totais da bancada de ensaio (AM)

Pos.	Designação	Quant.	Especificações	Preço [€] s\ IVA
1	Tinas Polipropileno	2 [-]	esp. 15 mm; reforços em PP; tampa em PP	1290
2	Lã de Rocha	15 [m ²]	55 kg/m ³	105
3	Resistências	6 [-]	Ref.: CRIX-700; Cobre normal; P=2 kW;	415
4	Controlo	1 [-]	Ver capítulo “Controlo”	496
5	Tubo Quadrado.Aco 40x50 (x6)	6 [m]	Tubo quadrado 40 x 50 mm; Espessura 6 mm; Aço st37;	50
6	Tubo Duo.Aco 22x1.5	56 [m]	Tubo redondo Ø22 mm; Espessura 1.5 mm; Aço st37;	168
7	Duouniao.T/R – 6Lx1/8	972 [-]	Ligação bi-cone de aço st 37;	631,8
8	Duouniao.T/R – 22Lx3/4	80 [-]	Ligação bi-cone de aço st 37;	198,4
9	Duotampao/ Bicone – 22L	80 [-]	Tampão normalizado para acessório bi-cone;	96
10	Montagem Colectores	4 [-]	Montagem especializada de todos os componentes que compõem o colector;	330
11	Manómetros Simples	2 [-]	Gama 0-250 bar; Erro ±0.05 bar;	35,2
12	Manómetro de Arrasto	1 [-]	Gama: 0-250 bar; Erro ±0.05 bar;	15,4
13	Bomba Hidráulica de Ensaio	1 [-]	Bomba manual; Gama 0-250 bar;	209
14	Acessórios de Ligação	[-]	Acessórios característicos de instalações hidráulicas;	50
15	Niquelagem dos colectores	4 [-]	Interior e exterior; esp. 5 µm;	920
16	Montagem do sistema	[-]	Montagem especializada de todos os componentes;	100
Total				4911,4

6. ANÁLISE ECONÓMICA

O desenvolvimento da utilização das energias renováveis tem conduzido a um forte aumento da procura de sistemas de armazenamento de energia. Sendo a água quente uma forma de baixo custo e bastante eficiente de conseguir este armazenamento, a procura de sistemas de acumulação de água quente e consequentemente dos permutadores neles acoplados tem acompanhado esse forte aumento de procura.

Respeitando a lei da oferta e da procura, a elevada procura, ainda que indirecta, de permutadores de calor imersos induziu um aumento substancial do preço das matérias-primas utilizadas.

Este aumento tem sido uma forte motivação para procurar novos materiais, para a aplicação em permutadores de calor. São necessários materiais de grande consumo, dado o aumento da necessidade.

O gráfico seguinte apresenta uma evolução crescente dos preços dos principais tipos de aço inox, na Europa, América e Ásia.

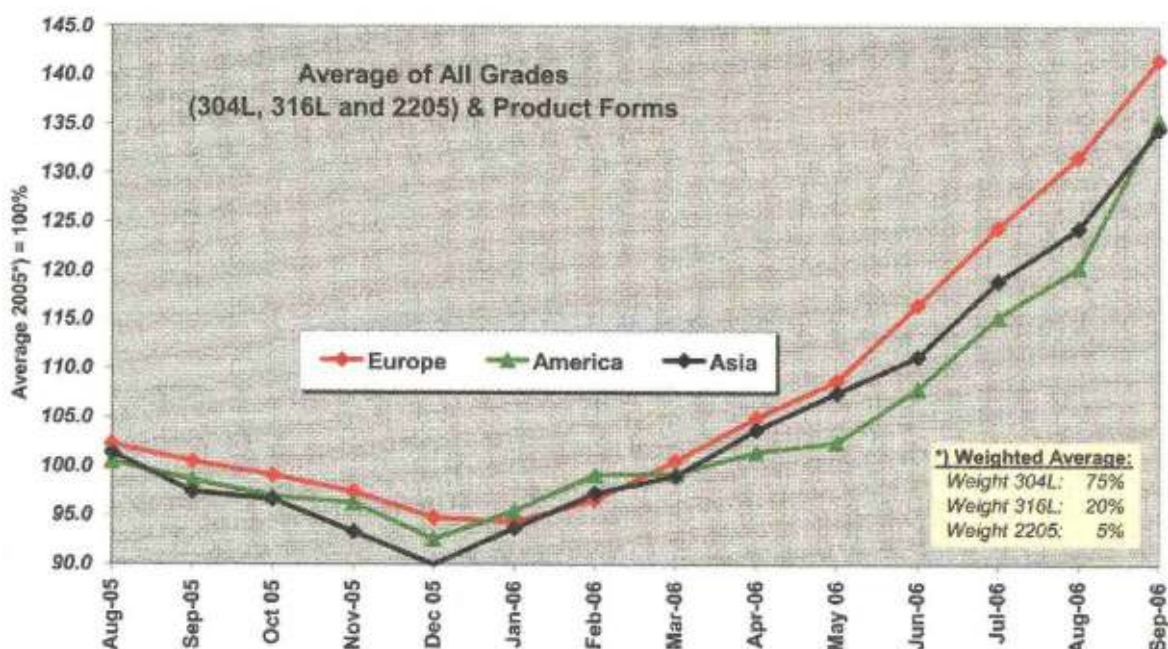


Figura 58 – Evolução dos preços dos principais tipos de aço inox, na Europa, América e Ásia, [14].

O software desenvolvido para a análise térmica possibilita também uma análise económica, dos resultados obtidos para as situações definidas.

A utilização deste módulo implica unicamente a definição do preço por metro dos materiais em estudo.

Outra abordagem passa por fixar o valor de um dos materiais e fazer variar o preço por metro do outro material, permitindo assim obter a relação de preços para que o valor final, independentemente do comprimento total de tudo necessário de um e outro material, seja semelhante.

Esta abordagem foi aplicada a um exemplo, com condições utilizadas em aplicações de permutadores de calor imersos.

O preço de tubo polimérico é definido com o valor de 1 e o preço do tubo metálico faz-se variar de 1 a 7, verificando a intercepção das rectas que definem o preço de cada um dos materiais.

A intercepção apresenta a relação de custos, razão entre o custo do material polimérico e o material metálico. Esta relação define o valor a partir do qual a aplicação dos materiais poliméricos se torna economicamente viável.

Ensaio 1

O gráfico seguinte refere-se aos comprimentos de cada um dos tubos calculados na análise térmica, para as condições apresentadas nesse mesmo capítulo, sendo este caso com uma transferência de calor de 6000 [W] e um caudal de 5 [l/min]

Tabela 26 – Características de ensaio

		Polímero	Cobre
		$D_i = 5,2$ e $D_o = 6$	$D_i = 9,7$ e $D_o = 12,7$
Calor [W]	Caudal [l/min]	L [m]	L [m]
6000	5	44,52	9,85

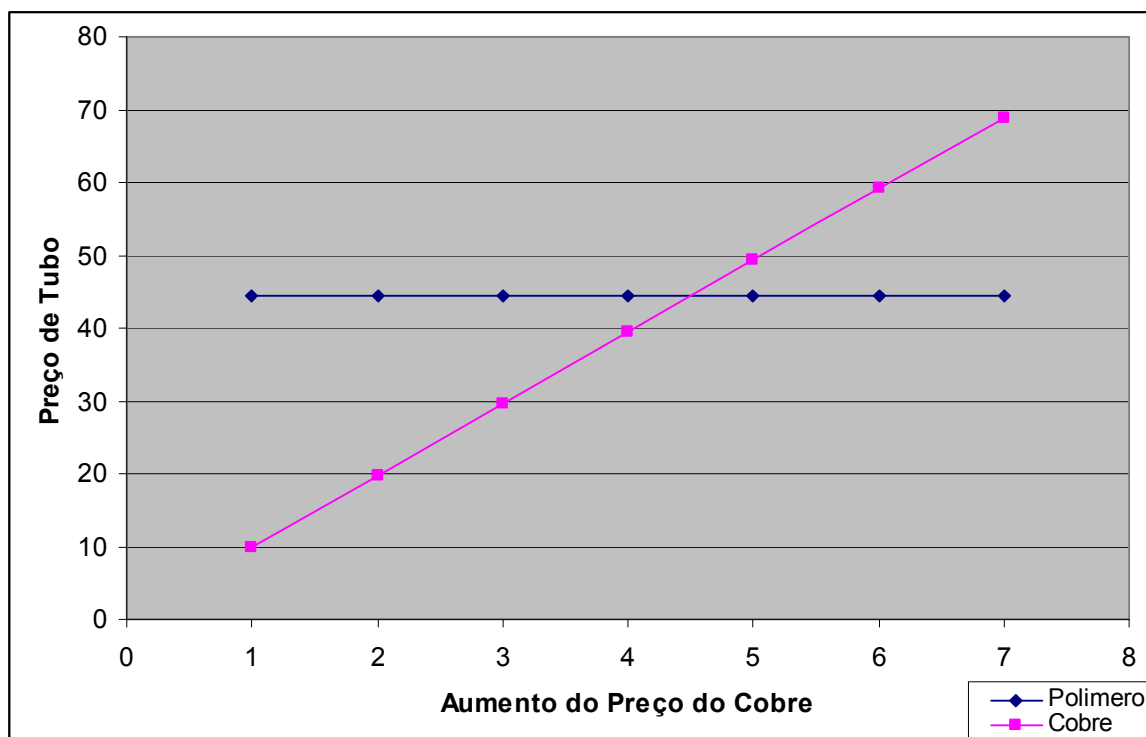


Figura 59 – Rentabilidade de um tubo polimérico fase a um tubo de cobre

Pode-se concluir-se que se o custo do cobre for 4,6 vezes superior ao custo do polímero ensaiado, então a utilização do material polimérico é mais rentável economicamente do que o cobre comercial. A relação de preços de 4,6 é considerada como economicamente viável.

Diminuindo o caudal para 3 [l/min], o valor desta relação diminui para 3,8, o que torna muito mais plausível a utilização de materiais poliméricos em permutadores de calor.

Ensaio 2

Serão aplicadas as características do ensaio 1, mas o material metálico utilizado é o aço inox.

Tabela 27 – Características de ensaio

		Polímero	Aço Inox
		$D_i = 5,2$ e $D_o = 6$	$D_i = 9,7$ e $D_o = 12,7$
Calor [W]	Caudal [l/min]	L [m]	L [m]
6000	5	44,52	9,85

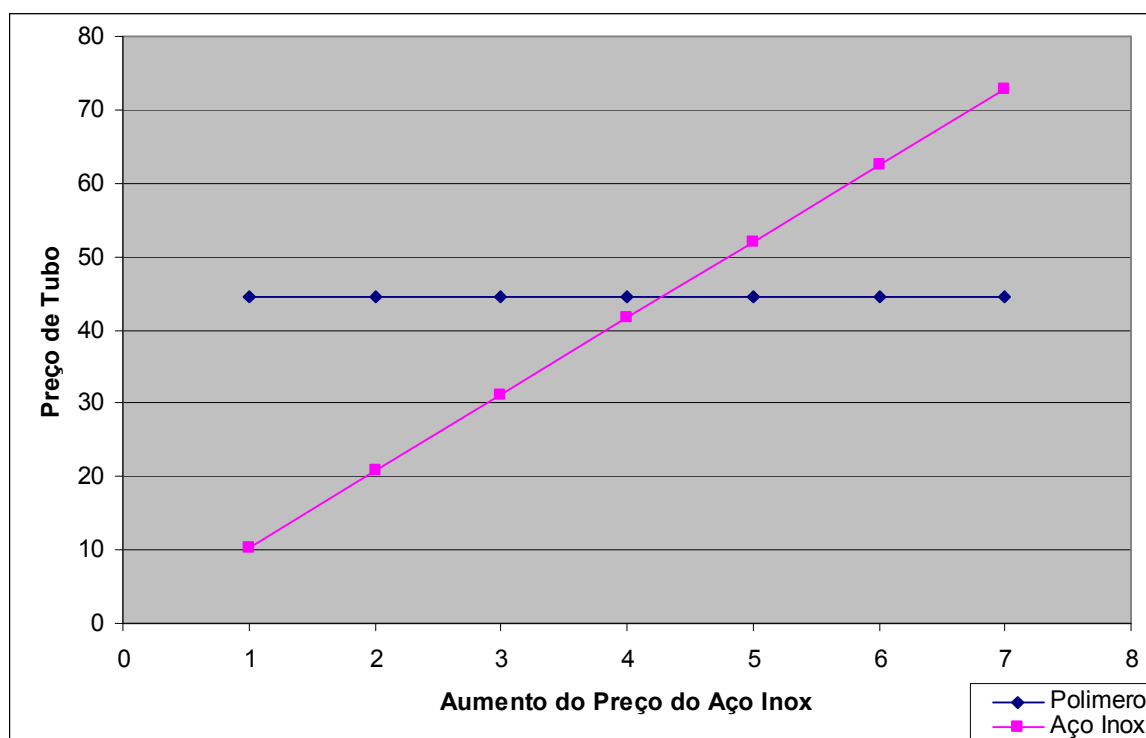


Figura 60 – Rentabilidade de um tubo polimérico face a um tubo de Aço Inox

A mudança do material metálico, de cobre para aço inox diminui a relação de preços para 4,2. Esta variação tem como causa o inferior valor do coeficiente de transferência de calor deste material em relação ao cobre.

Ensaio 3

Características semelhantes aos ensaios anteriores, diferenciando a geometria do tubo polimérico.

A diminuição do diâmetro do tubo implica um aumento do número de tubos necessários para responder aos princípios quer de geometria equivalente quer escoamento equivalente. Assim está-se a promover um aumento da área de transmissão de calor. A diminuição da espessura da parede diminui a resistência à passagem do calor por condução.

Tabela 28 – Características de ensaio

		Polímero	Cobre
		$D_i = 3,6$ e $D_o = 4$	$D_i = 9,7$ e $D_o = 12,7$
Calor [W]	Caudal [l/min]	L [m]	L [m]
6000	5	44,52	9,85

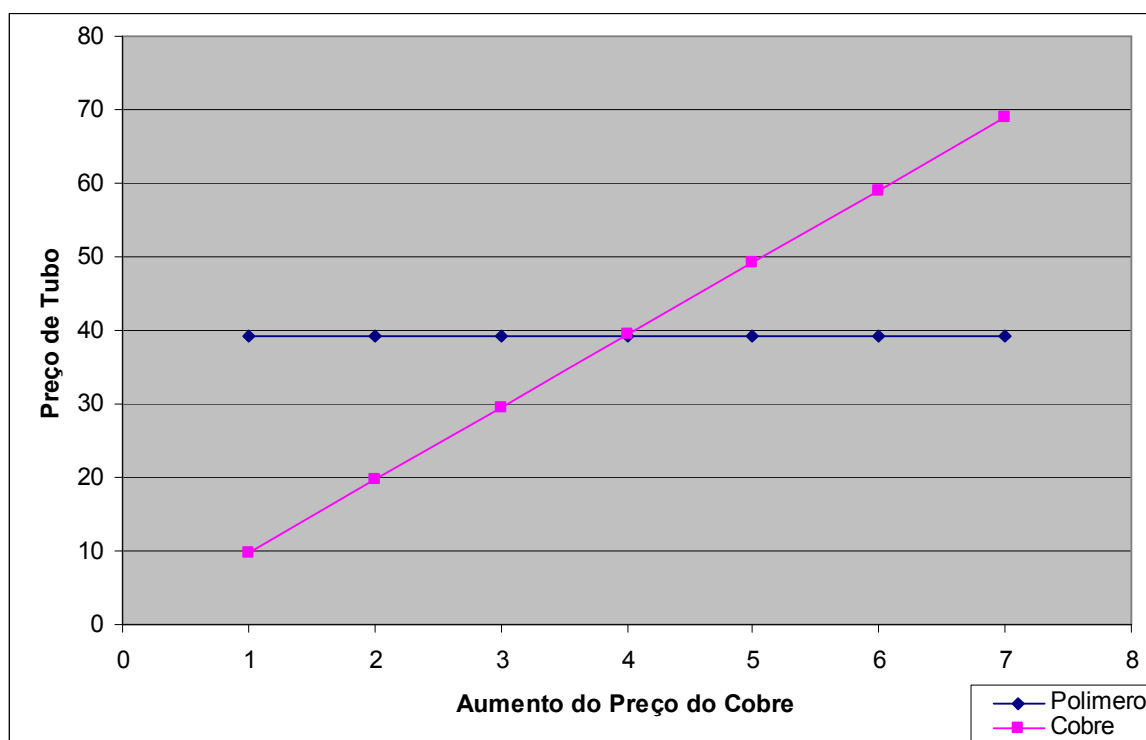


Figura 61 – Rentabilidade de um tubo polimérico face a um tubo de Aço Inox

As duas características referidas no parágrafo anterior têm como consequência uma redução da relação entre os dois tipos de material – polimérico e metálico – ficando em aproximadamente 4.

Conclusões

Os valores apresentados anteriormente mostram que a relação entre o preço do cobre e o preço do material polimérico, deverá ser entre 3 e 6, para que a aplicação de materiais poliméricos seja economicamente viável.

- A relação de preços é tanto maior quanto maior for o caudal utilizado.
- A relação de preços é tanto menor quanto menor for o diâmetro e espessura da parede do tubo polimérico.
- A redução do coeficiente de transmissão de calor provoca um aumento da relação de preços.

Os principais factores da variação da relação de preços são, a variação do coeficiente de transferência de calor por condução, por variação do material em que é construído o permutador de calor e a geometria do material polimérico. Com vista a aplicação de materiais poliméricos em permutadores de calor, a geometria do tubo deverá seguir no sentido da redução do diâmetro e da espessura da parede, sem comprometer o comportamento mecânico.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho vários aspectos relativos à utilização de materiais poliméricos foram abordados, desde o seu comportamento térmico e mecânico aos custos desta nova aplicação relativamente ao rendimento que se obtém.

Foram desenvolvidas ferramentas que permitem avaliar as vantagens e desvantagens de uma nova função dos polímeros, que à partida não teriam as propriedades indicadas para tal.

7.1. CONCLUSÕES

Um facto que se colocava como um obstáculo inultrapassável – o valor muito baixo do coeficiente de transferência de calor por condução dos materiais poliméricos, relativamente aos materiais metálicos comuns em permutadores de calor (cobre comercial e aço inox) – foi analisado num âmbito mais alargado. Foram analisadas outras características, como a geometria e os custos de produção, de transporte e reutilização, de modo a verificar se a utilização de materiais poliméricos é ou não viável.

Pode concluir-se que devido à enorme variedade dos materiais poliméricos, existem polímeros com um comportamento mecânico que responde às exigências mecânicas desta aplicação com uma geometria que favoreça a transferência de calor.

A geometria dos tubos é o ponto de onde se pode retirar maior vantagem, sendo que os polímeros permitem a produção de tubos com um diâmetro reduzido e uma parede de baixa espessura. A substituição de um tubo metálico com um determinado diâmetro por vários, de diâmetro inferior, induz um aumento da área de transferência de calor. Esta substituição, pode ser feita de modo a fazer corresponder as áreas de escoamento e/ou a manter as perdas de carga, em ambas as situações.

A análise económica permitiu encontrar o ponto a partir do qual se começa a justificar a substituição por materiais poliméricos nos permutadores de calor imersos.

Os permutadores de calor imersos construídos em materiais poliméricos, deverão obedecer às características mecânicas exigidas para a aplicação em sistemas de aquecimento de água solar doméstico e a sua geometria deverá ter o menor diâmetro e espessura de parede, de modo a se obter uma maior área de transferência de calor. A análise económica indica qual a diferença de custo entre os materiais poliméricos e os metálicos que justifiquem a sua substituição

Outros aspectos pesam a favor dos materiais poliméricos, menor peso e consequente inferior custo de transporte; baixos custos de produção; grande leque de propriedades térmicas, mecânicas e económicas.

A expressão *“Engineering plastics is today seen as the key for making solar thermal energy competitive to conventional heating sources”*, [4] fica através deste trabalho mais e melhor fundamentada.

7.2. TRABALHO FUTURO

No decorrer deste trabalho foram sendo apresentadas direcções de trabalho futuro. Para a análise térmica é importante executar o procedimento experimental proposto, de forma a validar o procedimento de cálculo desenvolvido e implementado no software *PCi*.

A selecção de materiais deverá encontrar quatro materiais e implementar o procedimento experimental proposto para a análise mecânica, obtendo os dados tal como se descreveu no capítulo correspondente e posteriormente concluir quanto à possibilidade de aplicação em permutadores de calor imersos para utilizações domésticas.

A análise económica deverá ser baseada nos dois tipos de análise referidos anteriormente, nos custos de cada um dos materiais e nas avaliações de evolução dos mesmos ao longo do tempo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VALOREN (*Valorização dos Recursos Endógenos Nacionais*), *Relatório Final de Execução (1987-1992)*, Comissão do Programa VALOREN
- [2] Davidson, W., Mantell, S. C. - **Polymer Heat Exchangers for Low Cost Water Heating Systems**, Department of Mechanical Engineering – University of Minnesota, 2000
- [3] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), publicado em Diário da República em 4 de Abril de 2006
- [4] IEA – International Energy Agency, **Solar Heating & Cooling Programme, Polymeric Materials for Solar Thermal Applications**, 2nd Draft for the 58th ExCo-meeting in Sydney, Australia , December 2005
- [5] Incropera, Frank P., DeWitt, David P. – **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, 5^a Edição. John Wiley & Sons, 2002
- [6] Holman, J. P., **Heat Transfer**, 7th ed., McGraw-Hill, 1999
- [7] **Solar Thermal – Markets in Europe**, European Solar Thermal Industry Federation, 2005
- [8] GREENPRO, **Energia Solar Térmica – manual sobre tecnologias, projecto e instalação**, Projecto parcialmente financiado pela Comissão Europeia, Janeiro 2004
- [9] Liu, W., Davidson, J. H., Mantell, S. C., - **Thermal Analysis of Polymer Heat Exchangers for Solar Water Heating**, Department of Mechanical Engineering – University of Minnesota, April 1999

- [10]** Liu, W., Davidson, J. H., Mantell, S. C. - **Thermal and Economic Analysis of Plastic Heat Exchangers for Solar Water Heating**, Department of Mechanical Engineering – University of Minnesota, April 1999.
- [11]** Newton, B. J., Schmid, M., Mitchell, J. W., Beckamn, W. A., **Storage tank Models**, Proceedings of the ASME International Solar Energy Conference, Vol. 2, 1995
- [12]** Ametek – Chemical Products, Product Information, **Immersion Coil Installation, Operation and Maintenance Guidelines**, 1999
- [13]** Dupont Ibéria S. L., Engineering Polymers, Technical Service
- [14]** Stainless Steel World News, Issue 14, November 2006
- [15]** Canto, Eduardo Leite – **Plásticos: Bem supérfluo ou mal necessário?**, Editora Moderna, 1995
- [16]** Davidson, J. H., Oberreit, D., Liu, W., Mantell, S. C., - **Are Plastic Heat Exchangers Feasible for Solar Water Heaters**, Department of Mechanical Engineering – University of Minnesota, April 1999
- [17]** CALORPLAST WÄRMETECHNIK GmbH, Siempelkampstraße 94
- [18]** Reviplast, Edição 39, Oditécnica / APIP, Jul/Ago/Set 2007
- [19]** BioPlastics Magazine, **1st PLA-Bottle-Conference**, September 2007
- [20]** Braskem, Petroquímica Brasileira, 2007
- [21]** Smith, Eric M., **Advances in Thermal Design of Heat Exchangers**, John Wiley & Sons, 2005

- [22]** Suntek Headquarters, 5 Holland, Building #215, Irvine
- [23]** MatWeb - The Online Materials Information Resource
- [24]** MSDN Library Visual Studio 6.0 Release, Copyright: Microsoft® Visual Studio™ 6.0 Development System, 2002
- [25]** **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)**, Diário da República – I Série –A, Decreto de Lei 80/2006, 4 de Abril de 2006
- [26]** International Organization for Standardization, **ISO/DIS 9080:1997(E) – Plastics piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation**, 1997.
- [27]** International Organization for Standardization, **ISO 1167-1 – Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure**, Part 1: General Method, First Edition, 2006
- [28]** International Organization for Standardization, **ISO 1167-2 – Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure**, Part 2: Preparation of pipe test pieces, First Edition, 2006

ANEXOS

COMPONENTES – CARACTERÍSTICAS E CUSTOS

A tabela seguinte apresenta os valores de todo o material orçamentado, para os vários cenários de construção da bancada experimental – *Análise Mecânica*.

Tabela 1 – Material para Desenvolvimento da Bancada de Ensaio (AM)

Pos.	Designação	Fornecedor	Descrição
1	Tinas Polipropileno	Galvacril, Lda	Tinas de <i>PP</i> com tampa 1500x1200x700
2	Tinas Inox	Avinox, Lda	Tinas de <i>Inox</i> com tampa 1500x1200x700
3	Lã de Rocha	Termarfan, Lda	Isolamento Densidade: 55kg/m ³
4	Resistências	Casa das Resistências, Lda	CRIX-700 Potência =2,5 kW
5	Controladores	F. Fonseca	
6	Acessório de Controlo	F. Fonseca	
7	Fittings Inox	Duorep, Lda	Ligação dos provetes ao colector de inox
8	Tampões Inox	Duorep, Lda	Tamponar as saídas do colector inox.
9	Fittings Latão	Duorep, Lda	Acessório para ligação do tampão na extremidade.
10	Tampões Latão	Duorep, Lda	Tamponar a extremidade do tubo.
11	Tampões Aço	Duorep, Lda	Tamponar a extremidade do tubo
12	Tubo Quadrado.Aco 40x50 (x6)	Duorep, Lda	Tubo principal do colector (manifold) – tubo de aço quadrado de 40x50x6
13	Tubo Duo.Aco 22x1.5	Duorep, Lda	Tubos de aço (Ø22) de distribuição de caudal – Ligação soldada do fitting
14	Tubo Duo.Aco 38x4.0	Duorep, Lda	Tubos de aço (Ø22) de distribuição de caudal – Ligação roscada do fitting

15	Acessório Duouniao.T/R – 6Lx1/8	Duorep, Lda	Ligação dos provetes ao colector de aço
16	Acessório Duouniao.T/R – 22Lx3/4	Duorep, Lda	Ligação dos tubos de aço (Ø22) de distribuição ao tubo de aço principal (manifold)
17	Acessório Duotampao/ Bicone – 22L	Duorep, Lda	Tamponar as saídas do tubo de aço (Ø22) principal (manifold)
18	Acessório Duouniao.T/R – 38Sx1/8	Duorep, Lda	Ligação dos tubos de aço (Ø38) de distribuição ao tubo de aço principal (manifold)
19	Acessório Duotampao/ Bicone – 38S	Duorep, Lda	Tamponar as saídas do tubo de aço (Ø38) principal (manifold)
20	Manómetros Simples – DUO.63.0/250 RV ¼	Duorep, Lda	Controlo da pressão – 0 a 250 bar
21	Manómetro de Arrasto – Diam.63 RV ¼ 0-250 bar	Duorep, Lda	Medição da pressão de rebentamento – 0 a 250 bar
22	Bomba Hidráulica de Ensaio	Lusavouga, S.A.	Colocar os dois colectores sob pressão e rebentar os tubos.
23	Acessórios de Ligação	Jorge Melo, Lda	Tubo interior de cobre; Teflon de vedação;
24	Colector Inox Paralelipipédico	Avinox, Lda	Colector Inox para 12 x 20 tubos
25	Colector Inox Tubular	Avinox, Lda	Colector Inox – tubo redondo – para 12 x 20 tubos.
26	Execução do colector	Duorep	Execução do colector e soldagem dos fittings.
27	Montagem	Jorge Melo, Lda	Montagem de todos os componentes

Na tabela seguinte foram apresentadas as vantagens de cada componente e a última coluna – “*Seleção*” – indica o componente seleccionado, mediante ponderação das vantagens que apresenta.

Tabela 2 – Material Orçamentado (AM)

Pos.	Designação	Quant.	Vantagens	Preço [€]	Selec.
1 –	Tinas Polipropileno	2 [-]	Preço baixo; Boa resistência térmica;	1560	✓
28	Tinas Inox	2 [-]	Resistência mecânica;	2000	
29	Lã de Rocha	15 [m ²]	Reduzir perdas de calor pelas paredes das tinas;	125	✓
30	Resistências	6 [-] 9 [-]	Custo inferior Menos tempo de aquecimento	502 754	✓
31	Controladores	2 [-]	“Setup” da temperatura	92	✓
32	Relés de estado sólido	2 [-]	Maior fiabilidade em longos períodos de operação	330	
33	Contactores	4 [-]	Colocados em paralelo 2x2; preço inferior à anterior posição	140	✓
34	Acessórios de Controlo	[-]	Montagem do equipamento de controlo	438	✓
35	Fittings Inox	480 [-] 480 [-] 1 [-]	Fixação directa ao colector Maior resistência à oxidação Ligação à bomba de ensaio	1200 1200 2.5	✓ ✓
36	Tampões Inox	480 [-] 12 [-]	Maior resistência à oxidação Maior resistência à oxidação	1032 29	
37	Fittings Latão	480 [-] 480 [-] 1 [-]	- Impossível – Custo inferior Custo inferior	317(c) 317(c) 0,66(c)	
38	Tampões Latão	480 [-] 12 [-]	Custo inferior Custo inferior	480(c) 12(c)	
39	Tampões Aço	960 [-]	Maior resistência / baixo custo	326	
40	Tubo Quadrado.Aco 40x50 (x6)	6 [m]	Custo inferior ao tubo inox	50	✓
41	Tubo Duo.Aco 22x1.5	56 [m]	Custo inferior ao tubo inox	168	✓
42	Tubo Duo.Aco 38x4.0	56 [m]	Custo inferior ao tubo inox	526	

43	Acessório Duouniao.T/R – 6Lx1/8	972 [-]	Ligação soldada ou roscada, directamente ao colector	631.8	✓
44	Acessório Duouniao.T/R – 22Lx3/4	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes – ligação soldada deste fitting ao tubo quadrado	198.4	✓
45	Acessório Duotampao/ Bicone – 22L	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes	96	✓
46	Acessório Duouniao.T/R – 38Sx1/8	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes – ligação roscada deste fitting ao tubo quadrado	740	
47	Acessório Duotampao/ Bicone – 38S	80 [-]	Permite retirar colunas de 12 provetes	348	
48	Manómetros Simples	2 [-]	Acompanhamento da pressão no interior do sistema	35.2	✓
49	Manómetro de Arrasto	1 [-]	Registo da pressão de rebentamento	15.4	✓
50	Bomba Hidráulica de Ensaio	1 [-]	Eléctrica – Aumento constante da pressão	694	✓
		1 [-]	Manual – Preço inferior	209	
51	Acessórios de Ligação	[-]	Ligação estanque dos componentes		✓
52	Colector Inox Paralelipipédico	2 [-]	Facilidade na montagem dos fittings (<i>pressão demasiado alta para esta configuração</i>)		
53	Colector Inox Tubular	2 [-]	Suporta sem comprometer a pressão exigida para o ensaio		✓
54	Niquelagem do colector tubular em aço	4 [-]	Protecção à oxidação	920	✓
55	Execução do colector	[-]	Execução do colector e soldagem dos fittings.		
56	Montagem	[-]	Montagem profissional de todos os componentes enunciados	50	✓